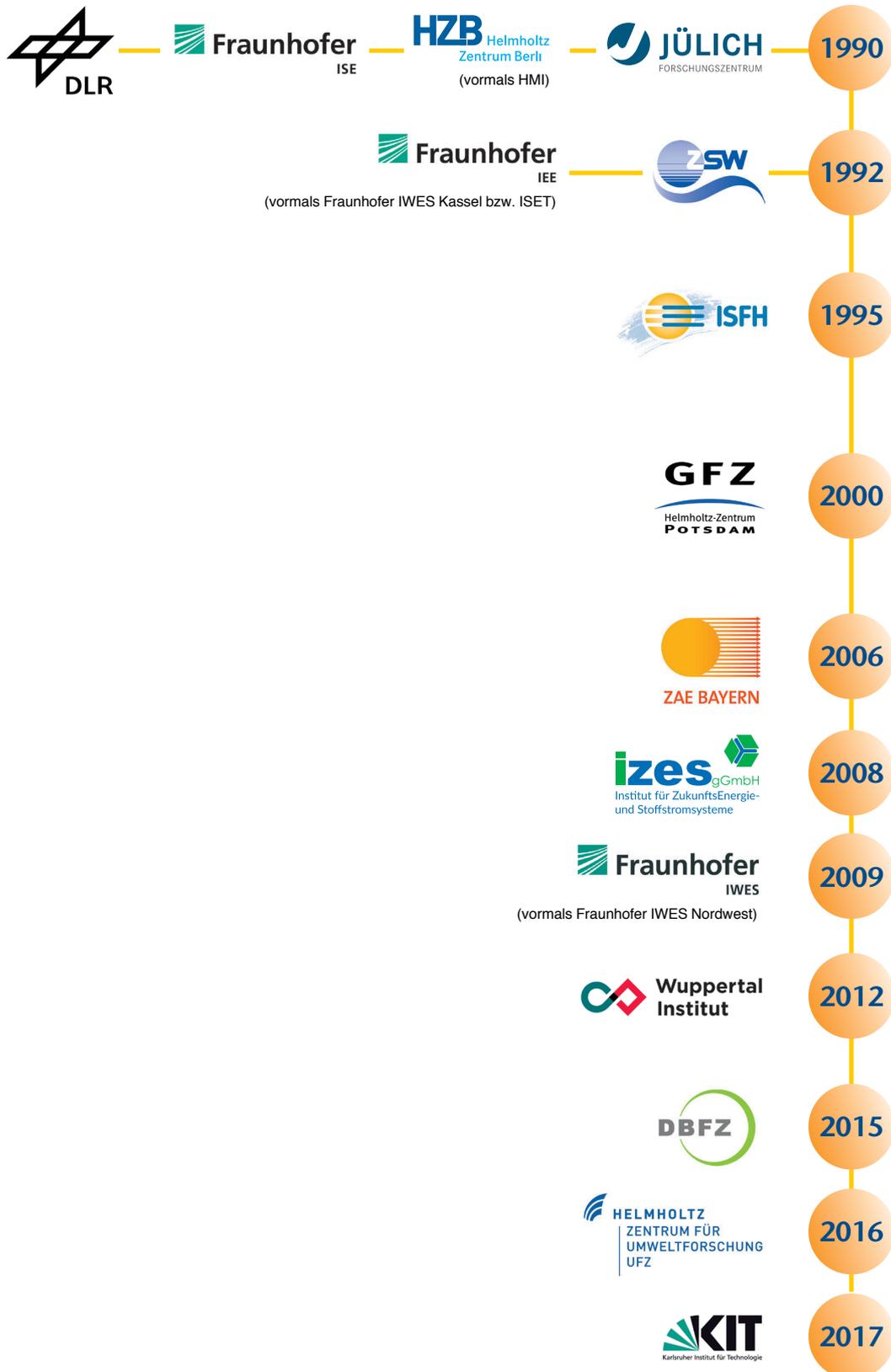


# Forschungsziele 2019



**ForschungsVerbund Erneuerbare Energien**  
**Gemeinsam forschen**  
**für die Energie der Zukunft**

## Die Mitgliedseinrichtungen des FVEE



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Über den FVEE</b>	
	Forschungs- und Entwicklungsfelder .....	<b>4</b>
	Ziele .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Energiebereitstellung</b>	
	Photovoltaik .....	<b>6</b>
	Solarthermie .....	<b>10</b>
	Windenergie .....	<b>13</b>
	Bioenergie .....	<b>14</b>
	Geothermie .....	<b>17</b>
	Meeresenergie .....	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>Systemkomponenten</b>	
	Energienetze	
	Stromnetze .....	<b>20</b>
	Wärmenetze .....	<b>22</b>
	Systemintegration und Sektorkopplung .....	<b>24</b>
	Energiespeicher	
	Elektrische Energiespeicher .....	<b>26</b>
	Thermische Energiespeicher .....	<b>27</b>
	Chemische Energieträger .....	<b>28</b>
	Speicherung im geologischen Untergrund .....	<b>30</b>
	Energiewandler	
	Brennstoffzellen .....	<b>31</b>
	Erneuerbarer Wasserstoff .....	<b>33</b>
	Kühlung .....	<b>35</b>
	Wärmepumpen .....	<b>36</b>
	Wandlung Wärme in Strom .....	<b>38</b>
	Gasturbinen .....	<b>39</b>

**4**

## Energienutzung

Energieeffiziente Gebäude .....	<b>40</b>
Energieeffiziente Quartiere und Städte .....	<b>43</b>
Energieeffizienz in Industrie und GHD .....	<b>45</b>
Nachhaltige Mobilität .....	<b>47</b>

**5**

## Energiesystemgestaltung

Energiesystemanalyse und Technologiebewertung .....	<b>49</b>
Akzeptanz- und Transformationsforschung .....	<b>51</b>
Energiewirtschaft .....	<b>53</b>
Energiepolitik und Energierecht .....	<b>55</b>
Energiemeteorologie .....	<b>57</b>

**6**

## Kontakt

Direktorium und Geschäftsstelle .....	<b>58</b>
Mitgliedseinrichtungen und Ansprechpartner .....	<b>59</b>
Impressum .....	<b>60</b>

## Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien stellt sich vor

### FVEE-Geschäftsstelle

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2  
10178 Berlin  
fvee@helmholtz-berlin.de  
Tel.: 030/288 7565-72

### Forschungsthemen im FVEE:

Die Übersicht zeigt, welche Institute im FVEE an welchen Forschungsthemen arbeiten (Institute in alphabetischer Reihenfolge).

Die Prozentzahlen und die Balken veranschaulichen den aktuellen Personaleinsatz je Thema.

Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE) ist eine bundesweite Kooperation von Forschungsinstituten. Die Mitglieder erforschen und entwickeln Technologien für erneuerbare Energien, Energieeffizienz, Energiespeicherung und das optimierte technische Zusammenwirken aller Systemkomponenten.

Außerdem werden übergreifende Untersuchungen zur Systemanalyse und zur Transformation des Energiesystems durchgeführt, wobei technische und sozio-ökonomische Aspekte Berücksichtigung finden. Ziel ist die Transformierung der Energieversorgung zu einem nachhaltigen Energiesystem.

### Forschen im Verbund

Der ForschungsVerbund wurde 1990 auf Anregung des Bundespräsidenten Richard von Weizsäcker gegründet, um die Forschungsaktivitäten für erneuerbare Energien zu intensivieren und zu bündeln.

Um die verschiedenen Expertisen zusammenzuführen, bildet der Verbund eine dezentrale Kooperationsstruktur.

Das Spektrum der Forschungsthemen umfasst alle erneuerbaren Energien, die einen Beitrag zum Energiemix aus Strom, Wärme und chemischen Energieträgern leisten können. Effizienztechnologien senken den Energiebedarf. Speichertechnologien und intelligente Steuerungssysteme bringen den Restenergiebedarf und das fluktuierende Angebot zum Ausgleich.

### Forschungsnetzwerk für die Energiewende

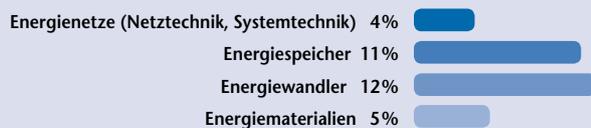
Als effizientes Forschungsnetzwerk ist der FVEE Teil einer zukunftsorientierten Forschungspolitik und ein kompetenter Ansprechpartner für Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Öffentlichkeit.

### Energiebereitstellung



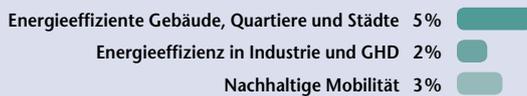
DLR • DBFZ • HZB • ISE • ISFH • IEE • Jülich • KIT • ZAE • ZSW  
DBFZ • DLR • ISE • ISFH • IZES • KIT • ZAE  
DBFZ • DLR • IEE • IWES • KIT • ZSW  
DBFZ • DLR • IEE • IZES • Jülich • KIT • UFZ • ZAE • ZSW  
GFZ • ISFH • KIT • UFZ • ZAE

### Systemkomponenten



DLR • DBFZ • IEE • ISE • ISFH • IWES • Jülich • KIT • ZAE • ZSW  
DBFZ • DLR • GFZ • HZB • IEE • ISE • ISFH • IWES • Jülich • KIT • UFZ • ZAE • ZSW  
DBFZ • DLR • HZB • IEE • ISE • ISFH • IWES • Jülich • KIT • UFZ • ZAE • ZSW  
HZB • ISFH • Jülich • KIT • ZAE

### Energienutzung



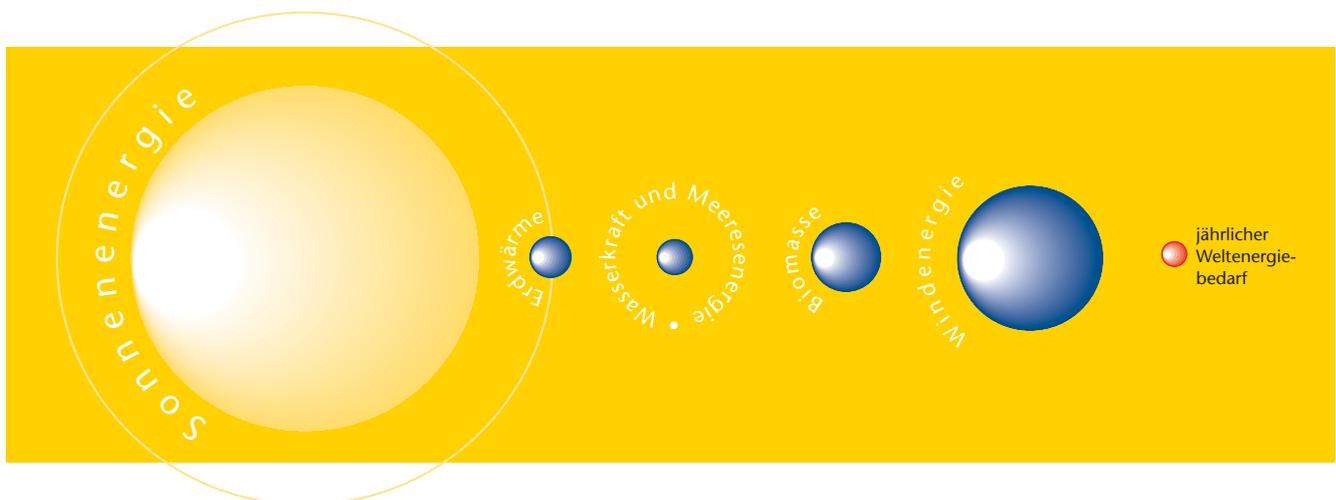
DLR • DBFZ • GFZ • IEE • ISE • ISFH • IZES • KIT • UFZ • WI • ZAE  
DLR • ISFH • KIT • WI • ZAE  
DLR • DBFZ • IEE • ISE • KIT • WI • ZAE • ZSW

### Energiesystemgestaltung



DBFZ • DLR • IEE • ISE • ISFH • IZES • Jülich • KIT • UFZ • WI • ZAE • ZSW  
DLR • DBFZ • ISE • ISFH • IZES • Jülich • KIT • UFZ • WI • ZAE  
DBFZ • DLR • IEE • ISE • ISFH • IZES • KIT • UFZ • WI • ZAE • ZSW  
DLR • DBFZ • IEE • ISE • IZES • Jülich • KIT • UFZ • WI • ZSW  
Jülich • KIT • UFZ • WI

## Gemeinsam forschen für eine nachhaltige Energieversorgung



### Klimaschutz

Die energie- und umweltpolitischen Vorgaben orientieren sich am internationalen Ziel, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C im Vergleich zu vorindustriellen Levels zu begrenzen (COP21).

Erneuerbare Energien und Energieeffizienztechnologien können hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten und helfen, die durch den Menschen verursachten Klimaveränderungen abzuschwächen.

### Versorgungssicherheit

Erneuerbare Energien bieten Ersatz für die absehbar knapp werdenden fossilen Energieträger Öl, Gas und Kohle. Erneuerbare reduzieren Importrisiken zum einen durch die Ausschöpfung der Energieeffizienzpotenziale, wodurch das absolute Nachfrageniveau abgesenkt wird, und zum anderen durch ihre überwiegend lokale oder regionale Verfügbarkeit.

### Wirtschaftlichkeit

Erneuerbare Energien gewährleisten bei Ausschöpfung ihrer Kostensenkungspotenziale eine wirtschaftliche und kostenstabile Energieversorgung. Die Produktion von technischen Komponenten und Systemen für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen entwickelt sich zu einem wesentlichen Bestandteil der globalen Wirtschaft. Im Bereich der Energieeffizienz bestehen hohe Potenziale, die in vielen Bereichen unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ausgeschöpft werden können.

### Sozial gerechte Energieversorgung

Erneuerbare Energien sind eine saubere, sichere und in Zukunft zunehmend erschwingliche Energiequelle. Ihre Nutzung lässt sich mit der Schaffung regionaler Arbeitsplätze und der Hebung des Lebensstandards durch lokale Wertschöpfung und dezentrale Wirtschaftsstrukturen verbinden.

### Priorität für Erneuerbare

Um die energiepolitischen Ziele zu erreichen, muss der Einführungsprozess erneuerbarer Energietechnologien entscheidend beschleunigt werden. Grundvoraussetzung dafür ist eine deutlich stärkere Förderung von Forschung und Technologieentwicklung. Ein Schwerpunkt muss u. a. die Bereitstellung von Systemdienstleistungen sein, damit die erneuerbaren Energien schneller energiewirtschaftliche Aufgaben übernehmen können und ihren Beitrag als zukunftsfähigen Wirtschaftsfaktor verstärken.

### Effizienz steigern

Für eine Gesamtoptimierung des Energiesystems bedarf es gezielter Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen zur Erhöhung der Effizienz bei Energiebereitstellung und -nutzung sowie in allen Anwendungsbereichen.

### Spitzenplatz erhalten

Die deutsche Forschung und Entwicklung für Energietechnologie steht im internationalen Vergleich auf einem Spitzenplatz. Kurze Innovationszyklen sind Indikatoren einer raschen Umsetzung in den Markt und bestätigen eine effiziente und anwendungsnahe Forschung und Entwicklung auf hohem Niveau. Forschung und Entwicklung sind weiterhin notwendig, um die beträchtlichen Innovationspotenziale zu mobilisieren.

### Erneuerbare in die Gesellschaft einbinden

Für die Transformation des Energiesystems müssen über die technischen Aspekte hinaus auch ökologische, soziologische und ökonomische Fragestellungen schon im frühen Stadium der Forschung einbezogen werden. Daher spielen interdisziplinäre Forschungsansätze insbesondere für Systemanalyse und Technikbewertung eine unverzichtbare Rolle. Untersuchungen zu Markteinführungsprogrammen, Marktmodellen und spezifischen Förderinstrumenten werden begleitet von Forschungen zu Akzeptanz und Umweltwirkungen.

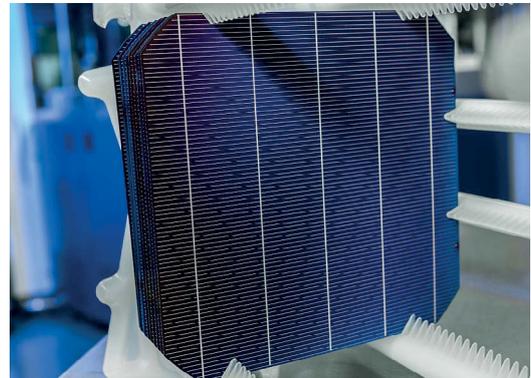
### Potenziale der Erneuerbaren

Das jährliche Angebot erneuerbarer Energien kann den Weltenergiebedarf ungefähr 20.000-fach decken. (Abschätzung: Dr. Nitsch • DLR)

## Photovoltaik

**Links: Mehrfachsolarelle**  
aus III-V-Halbleitern und Silizium,  
die 33,3 % des Sonnenlichts in  
Strom wandelt.  
© Fraunhofer ISE / Foto: Dirk Mahler

**Rechts:**  
**PERC-Solarelle mit 21,2 %**  
Bei der mit industriellen Prozessen  
hergestellten PERC-Solarelle  
(Passivated Emitter and Rear Cell)  
wird der Silizium Wafer auf der  
Rückseite durch dielektrische  
Schichten passiviert. © ISFH



### Kontakte

#### DLR

Dr. Martin Vehse  
Tel.: 0441/99906-218  
martin.vehse@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Dr. Philipp Strauß  
(Systemtechnik, Netzintegration)  
Tel.: 0561/7294-144  
philipp.strauss@iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Dr. Harry Wirth  
(Module und Kraftwerke)  
Tel.: 0761/4588-5858  
harry.wirth@ise.fraunhofer.de

Dr. Olivier Stalter  
(Leistungselektronik)  
Tel.: 0761/4588-5467  
olivier.stalter@ise.fraunhofer.de

Prof. Dr. Stefan Glunz  
(Grundlagen und Konzepte  
für höchsteffiziente Solarellen,  
III-V und Konzentratorzellen)  
Tel.: 0761/4588-5191  
stefan.glunz@ise.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Ralf Preu  
(PV Produktionstechnologie)  
Tel.: 0761/4588-5260  
ralf.preu@ise.fraunhofer.de

Dr. Uli Würfel  
(Farbstoff-Solarellen, organische  
und neuartige Solarellen)  
Tel.: 0761/203-4796  
uli.wuerfel@ise.fraunhofer.de

#### HZB

Prof. Dr. Bernd Rech  
(Silizium und Perowskit  
Grundlagen und Technologie)  
Tel.: 030/8062-41331  
bernd.rech@helmholtz-berlin.de

Das Sonnenlicht, das auf eine Solarelle fällt, wird zunächst in der photoaktiven Schicht absorbiert und erzeugt dort Paare von positiven und negativen Ladungsträgern. Durch die spezielle Architektur der Solarellen werden diese Ladungsträger dann getrennt und über die Kontakte in den äußeren Stromkreis abgeführt. Typischerweise besteht die photoaktive Schicht aus einem Halbleitermaterial.

Der Beitrag der Photovoltaik (PV) zur Stromerzeugung steigt rasant an. Weltweit waren Ende 2017 rund 450 GW an PV-Modulen installiert, davon 42 GW in Deutschland. Im Jahr 2017 deckte die PV 7 % des deutschen Nettostromverbrauchs (Datenquelle: Photovoltaics Report 2018, Fraunhofer ISE). Langfristig wird die Photovoltaik weltweit eine tragende Säule für ein nachhaltiges Energieversorgungssystem bilden.

Vorteile und Bedeutung der PV im Energiesystem:

- + Die Strahlung der Sonne ist unerschöpflich und übersteigt den Energiebedarf um ein Vielfaches.
- + Die Stromerzeugung durch Photovoltaik ist risikolos, emissionsfrei und ermöglicht eine nachhaltige Energieversorgung.
- + PV ist mit Stromgestehungskosten zwischen 3,7 und 11,5 €Cent/kWh in Deutschland wettbewerbsfähig, lukrativ für Investoren und zeigt Potenzial für weitere Kostenreduktion (Datenquelle: Studie zu Stromgestehungskosten, Fraunhofer ISE, 2018).

- + PV hat in Deutschland und weltweit hohe Ausbaupotenziale.
- + PV hat von allen Stromerzeugungstechnologien die höchste Akzeptanz in der Bevölkerung.
- + Modularität der PV-Technik ermöglicht Anlagen nach den jeweiligen Bedürfnissen vor Ort und stufenlose Erweiterung nach Bedarf.
- + Deutschland nimmt weiterhin eine internationale Spitzenstellung als hochqualitativer Forschungs- und Entwicklungsstandort ein.

### Potenziale

Die Preise für PV-Module sind in den letzten 25 Jahren um ca. 96 % gesunken. In Deutschland lässt sich der PV-Strom mit kleinen Aufdachanlagen bereits für unter 12 €Cent/kWh erzeugen und liegt damit deutlich unter dem Bezugsstrompreis für private Haushalte. Der angestrebte Umbau des Energiesystems in Deutschland erfordert eine Photovoltaikinstallation bis in den dreistelligen GW-Bereich und ein jährliches Austauschvolumen von über 5 GW.

Weltweit kopieren zahlreiche Länder die erfolgreiche deutsche Markteinführung, und an vielen netzfernen Einsatzorten ersetzt der PV-Strom den Strom aus Dieselgeneratoren schon aus ökonomischen Gründen.

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Voraussetzung für eine großmaßstäbliche Aktivierung des langjährigen Marktwachstums ist eine gute Integration in das Energiesystem in Verbindung mit weiteren Kostensenkungen. Eine nachhaltig angelegte Forschung unterstützt dabei sowohl Untersuchungen zu den Grundlagen der Materialien und Prozesse als auch Weiterentwicklungen in den konkreten Komponenten (Zellen, Module, Wechselrichter) und Systemen. Zentrale Ziele sind die Steigerung der Wirkungsgrade und

der Modullebensdauer, eine Reduzierung des Materialeinsatzes und hochproduktive Herstellungsverfahren. Da eine abschließende Bewertung der unterschiedlichen Technologieansätze im Hinblick auf langfristige Entwicklungen derzeit noch nicht möglich und der technologische Wettbewerb ein wesentlicher Treiber der Kostenreduktion ist, muss die breitgefächerte Förderung verschiedener Technologien beibehalten werden:



#### Flexible Module aus emailliertem Baustahl:

Emaillierter Baustahl ist dünn und flexibel aber dennoch robust. Als Trägermaterial für effiziente Dünnschichtmodule verbindet er die Vorteile von elektrisch isolierendem aber starrem Glas mit denen einer flexiblen Metallfolie.  
© ZSW

### Grundlagenforschung

Zur Kostensenkung sind auch vollkommen neue physikalische Ansätze zu verfolgen. Exemplarisch dafür sind:

- Entwicklung von Stapelsolarzellen zur günstigeren Ausnutzung des spektral breit verteilten Sonnenlichts
- Entwicklung neuer Bauelementstrukturen von Solarzellen
- Solarzellen mit hochstrukturierten Absorbern und Nanostrukturen in der Fläche zur Verringerung von Reflexionsverlusten, zur Verbesserung der Kristallqualität oder zur Materialeinsparung
- Entwicklung des Photonenmanagements
- neue Materialsysteme und Halbleitertechnologien

### Kristalline Siliziumsolarzellen

Die Silizium-Wafer-Technologie besteht in der Prozessierung von monokristallinen oder multikristallinen Scheiben mit einer Dicke von unter 200  $\mu\text{m}$ .

- + Die kristalline Siliziumtechnologie dominiert weiterhin den deutschen und weltweiten Photovoltaik-Markt aufgrund der großen Fortschritte bei der Steigerung des Solarzellenwirkungsgrades so wie bei der Kostenreduktion in der Herstellung der Siliziumwafer, Solarzellen und Module.
- + Die Silizium-Photovoltaiktechnologie ist über lange Jahre erprobt und zeichnet sich durch eine hohe Zuverlässigkeit aus.

Trotz der enormen Fortschritte dieser Technologie gibt es noch sehr große Kostenreduktionspotenziale, die nur durch Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen erschlossen werden können:

- a. Höhere Wirkungsgrade, zum Beispiel durch:
  - neuartige Solarzellenstrukturen mit geringeren optischen und elektrischen Verlusten
  - extrem dünne Beschichtungen zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften
  - Verbesserung der Materialeigenschaften von Silizium
  - Photonenmanagement

- b. Einsparung und Substitution von kostentreibenden Materialien, insbesondere
  - kostenreduzierte Herstellung von Solar-Silizium (Solar-Grade-Si) und sägefreie Wafertechnologien
  - Prozessierung dünnerer Silizium-Wafer (120  $\mu\text{m}$ ) bis hin zu ultradünnen Wafern (< 80  $\mu\text{m}$ )
  - Ersatz von Silber als Leitermaterial
- c. Entwicklung kostengünstiger hochproduktiver Techniken (thermische, nass- und plasmachemische, hochgenaue laser- und druckbasierte Verfahren)

### Dünnschichtsolarzellen

Bei Dünnschichtmodulen bestehen die photoelektrisch aktiven Schichten aus nur wenigen Mikrometer dünnen Materialien, die großflächig abgeschieden werden. Die Technologien arbeiten mit verschiedenen Absorbermaterialien wie CIS-/CIGS, CdTe und GaAs, kristallinem Silizium sowie alternativen Materialien wie Perowskiten und Kesteriten.

- + Dünnschichtmodule benötigen zur Herstellung wenig Energie und Material.
- + Bestimmte Dünnschichttechnologien können auch schwache Lichtverhältnisse gut nutzen und bringen bei hohen Temperaturen gute Leistung.
- + Aufgrund der Effizienzrekorde im Labor gilt die CIGS-Technologie als eine der Dünnschichttechnologien mit dem größten wirtschaftlichen Potenzial.

Kostensenkungen können erreicht werden durch:

- Skalierungseffekte
- optimierte, effizientere Produktionstechnologien
- Verringerung des Materialeinsatzes
- Umsetzung der hohen Laborwirkungsgrade in die Modulproduktion
- direkte Gebäudeintegration
- alternative Substrate (Polyimid- und Stahlfolien) für die Rolle-zu-Rolle-Prozessierung
- Entwicklung und Optimierung neuer Materialien wie Kesterit-Solarzellen

Prof. Dr. Rutger Schlatmann  
(Produktionstechnologie für Silizium, CIGS, Perowskit und Multijunctions)  
Tel.: 030/8062-15680  
rutger.schatmann@helmholtz-berlin.de

### ISFH

Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel  
Tel.: 05151/999-100  
rolf.brendel@isfh.de

Prof. Dr. Jan Schmidt  
(Materialforschung)  
Tel.: 05151/999-425  
j.schmidt@isfh.de

Dr. Karsten Bothe  
(Charakterisierung & Simulation)  
Tel.: 05151/999-425  
k.bothe@isfh.de

Dr. Thorsten Dullweber  
(Solarzellen & Module)  
Tel.: 05151/999-638  
dullweber@isfh.de

### Jülich

Prof. Dr. Uwe Rau  
Tel.: 02461/61-3791  
u.rau@fz-juelich.de

### KIT

PD Dr. Alexander Colsmann  
(OPV und Perowskit PV)  
Tel.: 0721/608-48587  
alexander.colsmann@kit.edu

PD Dr. Michael Hetterich  
(Kesterite, Perowskit PV, CIGS)  
Tel.: 0721/608-43402  
michael.hetterich@kit.edu

Prof. Dr. Uli Lemmer  
Tel.: 0721/608-42530  
ulrich.lemmer@kit.edu

Dr. Ulrich Paetzold  
(Perowskit PV und Photonenmanagement)  
Tel.: 0721/608-26357  
ulrich.paetzold@kit.edu

Prof. Dr. Bryce S. Richards  
Tel.: 0721/608-26562  
bryce.richards@kit.edu

**Gedruckte Solarmodule:**  
Einfache Prozesse bei niedrigen  
Temperaturen bieten ein hohes  
Kostenreduktionspotenzial.  
© ZAE/EnCN/Kurt Fuchs



### ZAE Bayern

Prof. Dr. Christoph Brabec  
Tel.: 09131/9398-100  
christoph.brabec@zae-bayern.de

Prof. Dr. Vladimir Dyakonov  
Tel.: 0931/70564-0  
vladimir.dyakonov@zae-bayern.de

PD Dr. Hans-Joachim Egelhaaf  
(gedruckte Solarmodule)  
Tel.: 0911/56854-9350  
hans-joachim.egelhaaf@zae-bayern.de

### ZSW

Prof. Dr. Michael Powalla  
Tel.: 0711/7870-263  
michael.powalla@zsw-bw.de

### Organische und gedruckte Solarzellen

Solarzellen auf der Basis von Halbleitergemischen in Lösung können mit Hilfe von Drucktechniken auf flexiblen Substraten großflächig hergestellt werden. Aktuelle Entwicklungen mit einer deutlichen Steigerung der Wirkungsgrade und Lebensdauern zeigen, dass gedruckte Solarmodule auch jenseits von Nischenanwendungen großes Potenzial aufweisen.

- + Organische Solarzellen (OPV) lassen sich in Fassaden einbauen; semi-transparente Module können sogar in Fenster integriert werden.
- + OPV verwenden umweltfreundlicher Rohstoffe, können unproblematisch entsorgt werden und haben niedrige Energierücklaufzeiten von nur wenigen Monaten.

Für die weitere Entwicklung organischer Solarzellen werden folgende Bereiche bearbeitet:

- Evaluierung neuer aus der Flüssigphase prozessierbarer Halbleitersysteme mit verbesserter Anpassung an das Solarspektrum und optimierten Ladungstransporteigenschaften
- Weiterentwicklung selektiver Schichten zwischen Elektrode und Absorber
- Verbesserung bestehender kostengünstiger Solarzellkonzepte und organischer Tandemsolarzellen
- Angepasste Produktionstechnologien wie zum Beispiel Rolle-zu-Rolle-Prozessierung
- Verbindungstechnologie
- Verkapselung insbesondere flexibler Solarzellen
- Verbesserung der Stabilität und Lebensdauer
- Lichtmanagement

### Perowskit-Solarzellen

Die noch junge Technologie nutzt das Know-how zu OPV und deren Aufbau, ersetzt jedoch die lichtabsorbierende Schicht durch Methylammonium-Bleijodid, einem organisch-anorganischen Kristall.

- + Mit Perowskiten werden im Labor Wirkungsgrade von über 20% erzielt, wobei ähnliche und kostengünstige Herstellungsprozesse wie bei der OPV zum Einsatz kommen.

Die beiden größten Herausforderungen auf dem Weg zur Marktreife sind

- die derzeit noch viel zu geringe Langzeitstabilität (u. a. ist der Kristall wasserlöslich)
- die Giftigkeit des Bestandteils Blei, den man möglichst durch einen alternativen Stoff ersetzen sollte.

Für Lösungsvorschläge ist ein tiefer gehendes Verständnis der Wirkungsprinzipien der noch jungen Perowskit-Technologie erforderlich.

### Konzentratorsolarzellen

Bei der PV-Konzentrator-Technologie wird das Sonnenlicht mittels einer Optik gesammelt und auf eine sehr kleine Solarzellenfläche gebündelt.

- + So wird im PV-System teures Halbleitermaterial eingespart und es können die effizientesten Solarzellen (industriell gefertigte Mehrfachsolarzellen auf Basis von III-V-Halbleitern mit über 42% Wirkungsgrad) eingesetzt und die inhärenten Vorteile hoher Ladungsträgergenerationsraten genutzt werden.
- + Die PV-Konzentrator-Technologie eignet sich besonders für Kraftwerke an Standorten mit viel direkter Sonneneinstrahlung.

Zur Kostensenkung werden folgende Forschungsschwerpunkte bearbeitet:

- Solarzellenstrukturen für höchste Leistungsdichten (bis 2000 Sonnen)
- kostengünstige industrielle Fertigungstechnologien der Solarzellen und der konzentrierenden Optik
- Anpassung von Konzentratoroptik und Solarzelle, innovativer Modulbau
- höhere Wirkungsgrade der Solarzellen
- Erforschung neuer Materialien

### Modultechnologie

- + Nach der elektrischen Verschaltung der Einzelsolarzellen sorgt die Verkapselung dafür, dass Solarmodule auch unter extremen Klimabedingungen langfristig betrieben werden können und ermöglicht die sichere Montage.

Forschungs- und Entwicklungsfragen sind unter anderem:

- Modultechnologien mit deutlich reduzierten Material- und Systemkosten
- Entwicklung von Hochleistungsmodulen mit hohem Flächenenertrag
- verlustarme elektrische Verschaltungsmethoden

und optisch effiziente Einkapselung

- deutlich gesteigerte technische Lebensdauern der Module für neue PV-Technologien
- Modultechnologien für spezielle Anwendungen, insbesondere für die Gebäudeintegration

### Gebrauchsdauer und Modulprüfung

Die erwartete Langzeitstabilität der Photovoltaik-Module muss für unterschiedlichste Klimabedingungen in geeigneten Alterungstests untersucht werden:

- Analyse und Modellierung von Alterungsmechanismen und deren Wechselwirkung
- Korrelation von natürlicher Alterung, beschleunigter Alterung und Prozessmodellen für die Degradation
- Verbesserung von Prüfverfahren und deren Weiterentwicklung für neue PV-Technologien
- Modellrechnung zur Alterung und zur Schadensbildung bei PV-Modulen

### Photovoltaische Kraftwerke und Systemtechnik

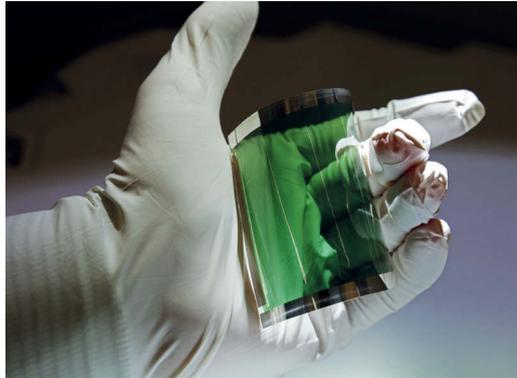
- + Photovoltaische Kraftwerke sind in Deutschland leistungsfähige und zuverlässige Stromlieferanten.
- + Sie werden sowohl in Deutschland als auch weltweit eine tragende Rolle im zukünftigen Energiemix spielen.

Breite Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen sind erforderlich:

- präzise Leistungs- und Ertragsprognosen von PV-Kraftwerken
- Steigerung der Performance Ratio (Verhältnis zwischen maximal möglichem und tatsächlich erreichten Ertrag) insbesondere für neue PV-Technologien
- Verstetigung der Stromproduktion im Tagesverlauf durch Erzeugungs-, Speicher- und Lastmanagement im Verteilnetz
- Technologieentwicklung zur Senkung der Systemkosten bei Material, Montage, Wechselrichter und allgemeine Elektroinstallation.
- Wartung und Zustandsdiagnose von Solarkraftwerken

### PV-Wechselrichter und Smart-Grid

- + Neben der Einspeisung von PV-Energie ins Netz können PV-Wechselrichter auch lokale Energiespeichersysteme steuern und zudem zur Spannungsstabilisierung im Stromnetz und zur Erhöhung der Übertragungskapazität beitragen.
- + Darüber hinaus sollen PV- und Batteriewechselrichter zunehmend netzbildend agieren, um diese Funktion der konventionellen Kraftwerke zu unterstützen, damit sie langfristig ersetzt werden können.



*Sonnenenergie aus Plastikfolien: mechanisch flexibles und semi-transparentes organisches Solarmodul, das auf gewölbten Oberflächen verwendbar ist und Licht durchlässt*  
© KIT

Forschungs- und Entwicklungsfragen sind u.a.:

- angepasste Wechselrichterlösungen zur Optimierung der Lastflüsse zwischen fluktuierenden und regelbaren Erzeugern, zeitabhängigen Verbrauchern und Speichern
- Entwicklung von kostengünstigen multifunktionalen „intelligenten“ Photovoltaik-Wechselrichtern, um lokal und regional die Lastflüsse zwischen fluktuierenden Erzeugern, zeitabhängigen Verbrauchern, Speichern und schnell regelbaren Stromerzeugern zu optimieren
- weitere Kostensenkung von Wechselrichtern sowie Steigerung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer auf das Niveau von PV-Modulen
- Entwicklung von Algorithmen und Simulationen zur Steigerung der Eigenverbrauchsquote beim Zusammenspiel von PV-Anlage, Batteriespeicher und Wärmepumpe sowie für deren netzdienlichen Betrieb
- Neben klassischen Freiflächen- und Aufdachsystemen bieten gebäudeintegrierte Anlagen ein hohes Flächenpotenzial. Um dieses Potenzial effektiv zu nutzen, bedarf es multifunktionaler Fassadenelemente sowie neuer Ansätze zur Verschaltung der Module zur Gebäudeintegration.

### Lebenszyklusanalyse und Recycling

Mit wachsenden Produktionskapazitäten für Solarzellen spielen Fragen des Recyclings, der technischen Lebensdauer und der Energierücklaufzeiten eine wichtige Rolle und sind zunehmend Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsprojekten:

- Reduktion von Material- und Energieeintrag bei der Herstellung
- Wiederverwertbarkeit der photovoltaischen Elemente und Materialien

### Energiemeteorologie

- Solarressourcen-Bewertung und spektral hochaufgelöste Solarstrahlungsdaten für die nächste Generation von PV-Technologien

## Solarthermische Kraftwerke und Hochtemperatur-Solarthermie (Strom und Prozesswärme)

**Solarturm des DLR in Jülich**  
Über 2000 bewegliche Spiegel (Heliostate) lenken einfallende Sonnenstrahlen auf den Solarturm, wo die konzentrierten Strahlen von einem Receiver aufgenommen und in Wärme umgewandelt werden. Angesaugte Umgebungsluft erhitzt sich auf bis zu 700 °C und erzeugt so Wasserdampf, der eine Turbine antreibt, die dann über einen Generator Strom produziert.

© DLR



### Kontakte

#### DLR

Prof. Dr. Robert Pitz-Paal  
Tel.: 02203/601-2744  
robert.pitz-paal@dlr.de

Prof. Dr. Bernhard Hoffschmidt  
Tel.: 02203/601-3200  
bernhard.hoffschmidt@dlr.de

#### Fraunhofer ISE

Dr.-Ing. Wolfgang Kramer  
(Solarthermie)  
Tel. 0761/4588-5096  
wolfgang.kramer@ise.fraunhofer.de

Dr. Thomas Fluri  
(Hochtemperaturspeicher für Kraftwerke)  
Tel.: 0761/4588-5994  
thomas.fluri@ise.fraunhofer.de

Dr. Thomas Schlegl  
(Energiesystemanalyse)  
Tel.: 0761/4588-5473  
thomas.schlegl@ise.fraunhofer.de

#### KIT

Prof. Dr. Robert Stieglitz  
Tel.: 0721/608-22550  
robert.stieglitz@kit.edu

Prof. Dr. Thomas Wetzel  
Tel.: 0721/608-23462  
thomas.wetzel@kit.edu

#### Wuppertal Institut

Dr. Peter Viebahn  
(Technikbewertung)  
Tel.: 0202/2492-306  
peter.viebahn@wupperinst.org

In solarthermischen Kraftwerken (engl. CSP = Concentrating Solar Power) wird mittels konzentrierender Kollektorsysteme eine so hohe Temperatur in einem Wärmeträgerfluid erzeugt, dass damit der Einsatz von fossilen Brennstoffen in einem konventionellen Kraftwerk ganz oder teilweise ersetzt werden kann. Die Technologie kann auch zur Bereitstellung von industrieller Prozesswärme, zur Kraft-Wärme-Kopplung und zur Entsalzung verwendet werden.

Solarthermische Kraftwerke sind zum Ausgleich der fluktuierenden Erneuerbaren wie Wind und PV geeignet, da sie in Kombination mit thermischen Energiespeichern (z. B. Speichertanks mit heißem geschmolzenem Salz) den Betrieb der Anlage auch bei Wolkendurchgängen oder nach Sonnenuntergang fortsetzen können. Zusätzlich kann ein Dampfkessel für fossilen Brennstoff, Müll oder Biomasse dafür eingesetzt werden, die sonnenarmen Zeiten zu überbrücken.

- + Solarthermische Kraftwerke können bedarfsgerecht Strom produzieren, weil sie kostengünstig thermische Energiespeicher integrieren oder fossile und biogene Brennstoffe zufeuern können. Sie können dies heute deutlich preiswerter als Batterien.
- + Mit konzentrierenden Kollektoren kann außerdem kostengünstige Hochtemperaturprozesswärme erzeugt werden.
- + Solarthermische Kraftwerke haben eine Energierücklaufzeit von wenigen Monaten.
- + Solarthermische Kraftwerke treiben rotierende Generatoren an und erhöhen damit die Netzstabilität.

### Potenziale

Bis Ende 2017 waren nach Angaben von SolarPACES 5,3 GW an solarthermischen Kraftwerken in Betrieb und etwa 1,3 GW im Bau sowie 4,4 GW in der Planung. Insbesondere in der MENA-Region und in China erfolgt zur Zeit das größte Wachstum.

Dabei sind deutliche Kostensenkungen zu beobachten: Verträge zu Stromlieferung aus solarthermischen Kraftwerken mit Speicher wurden 2018 in Dubai mit 7,3 \$cents/kWh abgeschlossen. In Verbindung mit PV-Systemen lässt sich Strom rund um die Uhr zu noch geringeren Kosten erzeugen.

Die weitere Integration solarthermischer Systeme in das europäische Verbundnetz erhöht die Stabilität der Netze auch in Deutschland und erlaubt mittelfristig sehr große Mengen an volatilen Wind- und PV-Strom stabil zu integrieren.

Ebenfalls besteht ein großes Potenzial für die Deckung des industriellen Prozesswärmebedarfs. Deutsche Unternehmen sind in der Projektentwicklung, bei Auslegung und bei der Lieferung von Komponenten im internationalen Wettbewerb gut aufgestellt.

## Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Bei solarthermischen Kraftwerken unterscheidet man diese Typen:

- Parabolrinnensysteme
- Solarturmsysteme
- Fresnelkollektorsysteme

Für alle drei solarthermischen Kraftwerkstypen besteht folgender F&E-Bedarf mit dem übergeordneten Ziel der Kostensenkung:

- 1) Integrationskonzepte für solarthermische Kraftwerke und Wärmespeicher im Verbund mit anderen erneuerbaren Energien mit dem Ziel einer bedarfsgerechten Bereitstellung von Strom und/oder Wärme, z. B. durch
  - Entwicklung neuer Hybridkraftwerke (z. B. CSP+PV oder CSP+Bioenergie)
  - Optimierung der Speicher in Bezug auf Be- und Entladeverhalten
  - Erhöhung der Wüstantauglichkeit und Minimierung des Wasserverbrauchs
- 2) Techno-ökonomische Effizienzsteigerung von solarthermischen Kraftwerken zur planbaren netzstabilisierenden Bereitstellung kostengünstiger elektrischer Energie, z. B. durch
  - Erhöhung der Receiver-Austrittstemperaturen zur Steigerung des Systemwirkungsgrades
  - Kostenoptimierung thermischer Speicher
  - Verbesserung des optischen und thermischen Wirkungsgrades von Konzentrator und Receiver
  - Gewichtsreduktion durch Struktur- und Materialoptimierung von Kollektoren und Konzentratoren
- 3) Nutzung innovativer digitaler Technologien, um CSP-Kraftwerke kostengünstiger, effizienter und zuverlässiger zu machen, z. B. durch
  - Automatisierung des Anlagenbetriebs mithilfe hochaufgelöster lokaler Strahlungsvorhersage (nowcasting)
  - Optimierung der Fertigungs- und Montagelogistik (BIM) und Nutzung von Rapid Prototyping/additiven Fertigungsverfahren (3D-Druck) für Schlüsselkomponenten, um Entwicklungszyklen zu beschleunigen
  - hochaufgelöste optische Messtechnik zur beschleunigten Inbetriebnahme sowie zur Erfassung des Betriebs-, Verschmutzungs- und Degradationszustands von Solarfeldern und Receivern in Verbindung mit maschinellem Lernen
- 4) Vorbereitung von Standards durch die Entwicklung von robusten Mess- und Prüfverfahren um die die Qualität von Komponenten und Subsystemen zu erfassen
  - Entwicklung von Messverfahren zur Zertifizierung von Komponenten und Systemen
  - In-situ Testverfahren zur Abnahme von Kollektorfeldern

- Entwicklung beschleunigter Alterungsverfahren für Aussagen über die Lebensdauer der kritischen Komponenten

### Parabolrinnen- und Fresneltechnologie

- Weiterentwicklung der Direktverdampfungs-Technologie
- Entwicklung alternativer Wärmefluidе wie Silikonöle und Salzschnelzen
- Selektive Solarabsorberschichten für hohe Temperaturen um 500 °C
- Entwicklung neuer optischer Konzentratorkonzepte

### Solarturm-Technologie

- Technologieentwicklung zur Einkopplung der Solarwärme in Gasturbinen zur Erschließung des Hochtemperaturpotenzials
- Entwicklung kostengünstiger bzw. hochreflektierender Spiegel, sowie Heliostate und Heliostatfeldsteuerungssysteme
- Neue Wärmeträgerfluide mit erweitertem Temperatureinsatzbereich von 100–1000 °C (Salzmischungen, keramische Partikel, Metallschnelzen)

### F&E für Hochtemperatur-Prozesswärme

Der Prozesswärmebedarf (80 bis 250 °C) verläuft in einigen Branchen parallel zum Strahlungsangebot. So könnten im Sommer nennenswerte Anteile des erhöhten Kühlbedarfs für Lebensmittel solar gedeckt werden. Insbesondere in Verbindung mit Wärmespeichern kann solare Prozesswärme auch für industrielle Prozesse bereitgestellt werden.

- Entwicklung integrierter Solaranlagentechnologien in mehreren Leistungsklassen und Demonstration in Pilotanlagen
- Entwicklung hocheffizienter und kostengünstiger Kollektoren, darunter auch konzentrierender Systeme für industrielle und gewerbliche Prozesswärme (auch in Verbindung mit KWK) sowie Meerwasserentsalzung
- Identifizierung erfolgversprechender Anwendungen durch Vorstudien (Screening) in Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und Branchenverbänden (z. B. Getränkeindustrie)
- Monitoring des Anlagenbetriebs und Zusammenfassung der Ergebnisse in Branchenenergiekonzepten
- Weiterentwicklung und Optimierung von Systemkomponenten und von Regelungs- bzw. Betriebsautomatisierungssystemen
- Aufbau, Betrieb und Monitoring von Pilotanlagen
- Entwicklung und Kostenoptimierung von Komponenten (z. B. Absorber und Speicher) für die jeweiligen Anwendungstemperaturen
- Entwicklung angepasster Finanzierungs- und Geschäftsmodelle zur Förderung der Markteinführung bzw. Marktdurchdringung

## Niedertemperatur-Solarthermie (Wärme)

Röhrenkollektor  
© Fraunhofer ISE



### Kontakte

#### DLR

Prof. Dr. Robert Pitz-Paal  
Tel.: 02203/601-2744  
robert.pitz-paal@dlr.de

Prof. Dr. Bernhard Hoffschmidt  
Tel.: 02203/601-3200  
bernhard.hoffschmidt@dlr.de

Klaus Hennecke  
Tel.: 02203/601-3213  
klaus.hennecke@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Dr. Dietrich Schmidt  
(Gesamtsystembetrachtung)  
Tel.: 0561/804-1871  
dietrich.schmidt@iee.fraunhofer.de

Dr. Michael Krause  
(Komponentenbewertung,  
Systemauslegung und Betrieb)  
Tel.: 0561/804-1875  
michael.krause@iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Dr.-Ing. Wolfgang Kramer  
(Thermische Solaranlagen)  
Tel.: 0761/4588-5096  
wolfgang.kramer@ise.fraunhofer.de

Dr. Korbinian Kramer  
(Prüfung und Zertifizierung,  
TestLab Solar Thermal Systems)  
Tel.: 0761/4588-5139  
korbinian.kramer@ise.fraunhofer.de

#### ISFH

Dr. Federico Giovannetti  
(Kollektoren)  
Tel.: 05151/999-501  
f.giovannetti@isfh.de

Carsten Lampe  
(Prüfung und Zertifizierung,  
Thermal applications ISFH CalTeC)  
Tel.: 05151/999522  
c.lampe@isfh.de

Dr. Rolf Reineke-Koch  
(Beschichtungen)  
Tel.: 05151/999-431  
r.reineke-koch@isfh.de

#### ZAE Bayern

Manfred Reuß  
Tel.: 089/329442-30  
manfred.reuss@zae-bayern.de

Rund 40% des Endenergieverbrauchs werden heute zur Beheizung von Gebäuden aufgewendet. Mittel- bis langfristiges Ziel ist es, im Neubau eine weitgehend vollständige Wärmeversorgung (Heizen und Brauchwasser) auf Basis von Solarwärme (aktiv und passiv) zu erreichen und im Gebäudebestand einen nennenswerten Anteil abzudecken. Ein weiteres Anwendungsgebiet mit wachsender Bedeutung ist die Bereitstellung von Prozesswärme auf höherem Temperaturniveau.

- + einfache und effiziente Wärmeerzeugung im Niedertemperaturbereich
- + niedrige Wartungs- und Betriebskosten
- + Verfügbarkeit und hohe flächenspezifische Erträge der Solarenergie
- + hohe Lebensdauer im Vergleich zu anderen Wärmeerzeugern

+ Niedertemperatur-Solarthermie ist mit allen anderen, konventionellen und erneuerbaren Wärmeerzeugern kompatibel und hat dabei systemstabilisierende Wirkung.

Sonnenkollektoren wandeln die auftreffende Sonnenstrahlung in Wärme um. Sie kann mit unterschiedlichen Technologien in verschiedenen Temperaturbereichen genutzt werden:

- Solarthermische Flach- oder Vakuumröhrenkollektoren erwärmen Brauch- und Trinkwasser für Haushalt und Raumheizung.
- Flach- und Vakuumkollektoren sowie konzentrierende Solarkollektoren (Parabolrinnen- und lineare Fresnelssysteme) stellen Prozesswärme auf höherem Temperaturniveau bereit für industrielle Anwendungen, für die Unterstützung von Wärmenetzen und zur Gebäudeklimatisierung.

### F&E für Niedertemperatur-Solarthermie

- Entwicklung effizienter Kollektoren und Anlagenkonzepte für die Gebäudeheizung zur Erhöhung der Betriebssicherheit und Senkung der Kosten im System
- Konzepte zur Reduzierung des Installationsaufwandes
- Entwicklung von Photovoltaik/Solarthermie-Hybridkollektoren, insbesondere im Kontext einer optimierten Systemintegration
- Entwicklung verbesserter und kostengünstiger Langzeitspeicher
- Entwicklung von modellbasierten vernetzten Regelungssystemen und Fernüberwachungsverfahren zur Ertragsoptimierung
- Konzepte für die Integration von Solarkollektoren in die Gebäudehülle bzw. Entwicklung von solaraktiven Gebäudehüllen
- Weiterentwicklung und Erprobung von Systemkonzepten zur solarer Deckung über 50%, mit den

- Schwerpunkten Vereinfachung der Systemtechnik und Kostensenkung
- Nachweis der Wirksamkeit von Niedertemperatur-Solarthermie in Bezug auf Endenergieeinsparung in breit angelegten Felduntersuchungen
- Entwicklung effizienter und kostengünstiger Kollektoren zur Wärmeerzeugung auf höherem Temperaturniveau
- Demonstration von „neuen“ Anwendungsfeldern mit Evaluierung des Anlagenbetriebs: Mehrfamilienhäuser, Solare Wärmenetze (gesamte Bandbreite: kalte Nahwärme, Low-Ex, 100 °C Netze), Prozesswärme
- Neue Materialien für kostengünstige Systeme und intelligente Gebäudeintegration
- Weiterentwicklung der Systemtechnik von Solarluftkollektoren

## Windenergie



### Windenergieanlagen

Onshore (Quelle: Fraunhofer IWES)  
und Offshore (Quelle: DOTI)

Windenergieanlagen wandeln die kinetische Energie der bewegten Luftmassen in elektrische Energie. Moderne Windkraftanlagen nutzen das Auftriebskonzept und entziehen dem Luftstrom einen Teil der Leistung. Bei der Windenergienutzung gehört Deutschland seit langem zu den Spitzenländern und steht nach China und den USA auf dem dritten Platz. Weltweit waren Ende 2016 Anlagen mit einer Gesamtleistung von ca. 487 GW installiert, davon 50 GW in Deutschland (<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>).

Die Nutzung der Windenergie ist zu einem bedeutenden Wirtschaftsfaktor geworden: In Deutschland trug die Windenergie im Jahr 2015 einen Anteil von rund 14 % zur Bruttostromerzeugung bei. Allein mit der Windenergienutzung an Land könnten bis zu 65 % des deutschen Strombedarfs gedeckt werden. Hier liegen die Stromgestehungskosten je nach Windstärke und Anlagengröße bei 5–11 Cent/kWh (Quelle: [windmonitor.de](http://windmonitor.de)) und können somit bereits heute an sehr guten Standorten mit denen konventioneller Kraftwerke konkurrieren. Rund 390 TWh ließen sich mit einer Gesamtleistung von knapp 200 GW verteilt auf je 2 % der Fläche aller deutschen Bundesländer jährlich erzeugen (Quelle: BWE/Fraunhofer IWES). Bestehende Standorte lassen

sich durch Repowering ertragreicher nutzen. Darunter versteht man den Ersatz älterer Anlagen mit geringer Leistung durch moderne Multimegawattanlagen. Für die Windenergienutzung auf See hat die Bundesregierung eine Leistung von 15 GW bis zum Jahr 2030 als Ziel formuliert. Davon sind bis Mitte 2017 rund 4,7 GW realisiert ([https://www.energy-charts.de/power\\_inst\\_de.htm](https://www.energy-charts.de/power_inst_de.htm)). Die Offshore-Windenergie ist besonders attraktiv, weil mit einer Anlage gleicher Leistung mehr als doppelt so hohe Erträge wie im Binnenland erzielt werden können. Die technologischen und logistischen Anforderungen sind aber auch deutlich höher und die Kosten für die Stromerzeugung aus Offshore-Windenergie sind derzeit mit 11–18 Cent/kWh (Quelle: [windmonitor.de](http://windmonitor.de)) noch etwa doppelt so hoch wie an Land.

Die wesentlichen Vorteile von Windenergie sind:

- + niedrige Stromerzeugungskosten
- + weltweit einsetzbar
- + sehr gut regelbar (Systemdienstleistungen)

Eines der wichtigsten Ziele der Forschung und Entwicklung ist eine weitere Kostenreduktion. Branchenexperten erwarten weitere 25–30 % bis 2030 (Quelle: IEA).

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf

#### Weiterentwicklung der Anlagentechnik

- Gewichtsreduktion durch neue Materialien, Verbundwerkstoffe und neue Bauweisen
- Elastizität, Strukturmechanik und Flattern
- Geräuschreduktion
- innovative Regelungsverfahren
- Generatoren und Leistungselektronik
- neue Anlagenkonzepte
- adaptive Rotoren
- automatisierte Produktionsverfahren
- computerbasierte Designprozesse
- Simulation und Optimierungsverfahren

#### Wind-Klimatologie und Umgebungsbedingungen

- Verbesserte Windpotenzialbestimmung
- Zielgenaue Standortfindung in komplexem Gelände
- Genauere Bestimmung der Schallausbreitung und -einwirkung
- Standortspezifische Anlagenauslegung
- Bestimmung des Nachlaufs größerer Windparks, um Abschattungsverluste zu vermeiden
- Wind- und Wellencharakteristik für Offshore-Anwendungen

#### Systemtechnische Einbindung

- Regelung und Betriebsführung von Windparks
- Fehlerfrüherkennung, zuverlässigkeits- und zustandsorientierte Instandhaltung
- Informations- und Kommunikationssysteme
- Netzwechselwirkungen und Systemdienstleistungen
- Verbesserte Windleistungsprognosen

### Kontakte

#### DLR

Dr. Jan Teßmer  
Tel.: 0531/295-3217  
[jan.tessmer@dlr.de](mailto:jan.tessmer@dlr.de)

Dr. Sarina Keller  
Tel.: 02203/601-4848  
[sarina.keller@dlr.de](mailto:sarina.keller@dlr.de)

#### Fraunhofer IEE

Dr. Reinhard Mackensen  
(Energiewirtschaft und Netzbetrieb)  
Tel.: 0561/7294-245  
[reinhard.mackensen@iee.fraunhofer.de](mailto:reinhard.mackensen@iee.fraunhofer.de)

Martin Shan  
(Regelungstechnik)  
Tel.: 0561/7294-364  
[martin.shan@iee.fraunhofer.de](mailto:martin.shan@iee.fraunhofer.de)

Dr. Philipp Strauß  
(Generatoren und Netzintegration)  
Tel.: 0561/7294-144  
[philipp.strauss@iee.fraunhofer.de](mailto:philipp.strauss@iee.fraunhofer.de)

#### Fraunhofer IWES

Prof. Dr. Jan Wenske  
Tel.: 0471/14290-502  
[jan.wenske@iwes.fraunhofer.de](mailto:jan.wenske@iwes.fraunhofer.de)

#### KIT

Prof. Dr. Stefan Emeis  
(Windressourcen offshore und in komplexem Gelände)  
Tel.: 08821/183-240  
[stefan.emeis@kit.edu](mailto:stefan.emeis@kit.edu)

#### ZSW

Andreas Rettenmeier  
(Windenergie-technik)  
Tel.: 0711/7870-229  
[andreas.retttenmeier@zsw-bw.de](mailto:andreas.retttenmeier@zsw-bw.de)

Anton Kaißel  
(Vorhersage)  
Tel.: 0711/7870-238  
[anton.kaisel@zsw-bw.de](mailto:anton.kaisel@zsw-bw.de)

## Bioenergie (Strom, Wärme, Kraftstoffe)

Abbildung nach  
„Smart Bioenergy“:  
(Hrsg.: Prof. Dr. Daniela Thrän –  
DBFZ/UFZ)



### Kontakte

#### DBFZ

Prof. Dr. Michael Nelles  
Tel.: 0341/2434-113  
michael.nelles@dbfz.de

Romann Glowacki  
Tel.: 0341/2434-464  
romann.glowacki@dbfz.de

#### DLR

Dr. Marina Braun-Unkhoff  
Tel.: 0711/6862-508  
marina.braun-unkhoff@dlr.de

Dr. Peter Kutne  
(Gasturbinen und KWK-Konzepte)  
Tel.: 0711/6862-389  
peter.kutne@dlr.de

Dr. Antje Seitz  
Tel.: 0761/6862-484  
antje.seitz@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Dr. Bernd Krautkremer  
(Systemtechnik, Demonstrations-  
und Pilotversuche)  
Tel.: 0561/7294-420  
bernd.krautkremer@  
iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Dr.-Ing. Achim Schaadt  
(Thermochemische Prozesse)  
Tel.: 0761/4588-5428  
achim.schaadt@ise.fraunhofer.de

#### IZES

Bernhard Wern  
(Stoffstrommanagement)  
Tel.: 0681/844 972-74  
wern@izes.de

Dr. Bodo Groß  
Tel.: 0681/844 972-51  
gross@izes.de

Die energetische Nutzung von Biomasse ist ein wichtiger Baustein der Energiewende. Im Jahr 2017 hatte Biomasse einen Anteil von 7,1 % am deutschen Primärenergieverbrauch (Quelle: BMWi / AGEE-Stat 2018). Dieser Anteil entspricht 54 % aller erneuerbaren Energien (EE).

### Ausgleichsfunktion

- + Durch gute Speicherbarkeit und wetterunabhängige Verfügbarkeit kann Bioenergie dazu beitragen, die nach Einsatz der Effizienztechnologien und der fluktuierenden erneuerbaren Energien noch verbleibenden Bedarfe bei Strom, Wärme und Mobilität abzudecken, und damit insbesondere den Stromsektor zu stabilisieren.
- + Durch die Kombination von Bioenergie und anderen Erneuerbaren sind alternative regionale Versorgungssysteme realisierbar.

### Querschnittsthema

Bioenergie bietet zeitlich und räumlich flexible Lösungen für Strom, Wärme und Kälte sowie für Mobilität. Daher muss sie mit allen anderen Komponenten im Energiesystem intelligent verknüpft werden.

- **Strom:** Feste Biomasse wird in (Heiz-)Kraftwerken verstromt; flüssige und gasförmige Biomasse kann mit Gasturbinen oder Motoren umgewandelt werden. Zukünftig werden die Anlagen flexibel betrieben, um zur Systemstabilisierung beizutragen. Neue Netzdienstleistungen wie Regelleistung und Residuallastdeckung entstehen. Nicht alle Kraftwerke können diese Aufgaben in gleicher Effizienz bewältigen.
- **Mobilität:** Biogene Treib- und Brennstoffe können fossile Kraftstoffe im Idealfall CO<sub>2</sub>-neutral ersetzen sowie mobile und stationäre Brennstoffzellen versorgen. Für Biokraftstoffe ist die Bandbreite geeigneter Ressourcen, technischer Ansätze und Endprodukte sehr groß. Heutige Biokraftstoffe werden in der Regel aus öl-, zucker- oder stärkehaltigen Rohstoffen gewonnen. Die Herstellung künftiger, verbesserter

Biokraftstoffe wird auch Abfälle, land- und forstwirtschaftliche Nebenprodukte, Algen sowie verstärkt Lignocellulose nutzen. Zudem gibt es vielversprechende und erprobte Optionen, Biomethan als Erdgassubstitut mit guten Umwelteffekten im Verkehr zu nutzen.

- **Wärme / Kälte:** Durch Verbrennung ist Biomasse direkt in Wärme umwandelbar: als feste oder flüssige Biomasse im Heizkessel, als Biogas oder Biomethan in Gasthermen. Außerdem fällt bei der Umwandlung von Bioenergieträgern in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen neben Strom immer Wärme an, die ressourceneffizient zum Heizen oder – mit Hilfe von thermisch betriebenen Kälteanlagen – zum Kühlen genutzt wird. In den Sommermonaten, wenn der Bedarf an Wärmeleistung sinkt, dafür aber mehr Kühlung bzw. Klimatisierung benötigt wird, bietet sich das Konzept der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) an. Insbesondere in Dampfprozessen kann Biomasse auch Prozessenergie bereitstellen.

### Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK)

Durch Kogeneration von Strom und Wärme/Kälte wird der Energiegehalt von Biomasse hocheffizient genutzt. KWKK-Anlagen für holzartige Biomasse sowie für Biogas und Biomethan sind in einem großen Leistungsbereich verfügbar und vielfältig einsetzbar. Verwendet werden u. a. mit biogenen Gasen betriebene Stirling-Motoren, Dampfmaschinen, Gasmotoren, (Mikro-)Gasturbinen, ORC-Anlagen (Organic Rankine Cycle Technik) und Dampfturbinen.

### Effiziente Technologien

Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung der Bioenergie sind energieeffiziente, emissionsarme Konversionstechnologien. Eingesetzt werden biologisch-chemische, thermo-chemische und physikalisch-chemische Umwandlungsprinzipien.

Zentrale Herausforderung ist die Flexibilisierung dieser Komponenten zu „smarten“ Bereitstellungskonzepten: Dabei geht es einerseits um ein integriertes Energiesystem, in dem die Bioenergie zielgerichtet andere fluktuierende erneuerbare Energiequellen im optimierten Zusammenspiel ergänzt und andererseits um die gekoppelte stofflich-energetische Nutzung der Biomasse im Rahmen der Bioökonomie (s. u.).

### Integrierte stofflich-energetische Nutzung

In der Bioökonomie wird die Ressource Biomasse durch die Kopplung von stofflicher und energetischer Nutzung sowie Kaskadennutzung höchsteffizient eingesetzt. Es entstehen neue und verlängerte Nutzungspfade und Wertschöpfungsketten. In Bioraffinerien wird die Prozessenergie klimaneutral aus einem Teil der eingesetzten Biomasse bereitgestellt oder als Energieträger

ausgekoppelt. Die eingesetzten Rohstoffe werden vollständig genutzt und Nährstoffe können in geschlossenen Kreisläufen geführt werden.

### Nachhaltige Rohstoffbasis

Die Verfügbarkeit von Biomasse ist limitiert. Im Ausbau von Koppel- und Kaskadennutzung, dem Schließen von Stoffkreisläufen sowie der Nutzung biogener Reststoffe liegen aber noch erhebliche Ausbau- und Optimierungspotenziale. Um diese Potenziale zu heben, sind Lebenszyklusanalysen zur Nachhaltigkeitsbewertung ein wesentliches Element. Der Einsatz von Biomasse trägt in besonderem Maße zum künftigen Kohlenstoffkreislauf bei, bei dem im Sinne der Kreislaufwirtschaft die fossile Rohstoffbasis von Energie- und Industriesektoren durch nachwachsende Rohstoffe und Recyclingströme ersetzt wird.

## Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Bioenergie

Bioenergie soll technisch und ökonomisch effizienter sowie ökologisch verträglicher werden. Die Forschung zielt auf die optimale energetische Biomassenutzung.

### F&E zur Einbindung von Bioenergie in das Energiesystem

Bioenergie muss ganzheitlich, systembezogen und im Zusammenspiel mit den anderen erneuerbaren Energieformen weiterentwickelt werden.

- Systemanalyse der bedarfsgerechten Bioenergiebereitstellung und Ableitung von Steuerungselementen
- Untersuchung der Bedeutung einer bedarfsgerechten Bioenergiebereitstellung im Rahmen der Sektorkopplung
- Markt- und Optimierungsmodelle zur Einbindung von Bioenergie ins Energiesystem, insbesondere jenseits des EEG: integrierte (inter-)kommunale Energiekonzepte zur Mobilisierung und Nutzung biogener Reststoffe
- Netzdienstleistungen von Bioenergieanlagen
- ökologische Aspekte und Nachhaltigkeitskriterien der Biomasseproduktion und stofflich-energetischen Nutzung
- räumliche, strukturelle und politische Rahmenbedingungen der Bioenergieproduktion
- Monitoringsysteme und Minimierung von Nutzungskonkurrenzen
- Verbesserung der lokalen Effekte und sozialen Akzeptanz von Biomassebereitstellung und Bioenergienutzung

### F&E zur Bereitstellung von Strom, Wärme und Kälte

Die dezentrale und kosteneffiziente Bereitstellung von Strom, Wärme und Kälte im industriellen und privaten Sektor soll weiter optimiert werden.

- Anlagenkonzepte für die netz- und versorgungsstabilisierende Integration von Bioenergieanlagen in bestehende und zukünftige Infrastrukturen
- Prozessregelung für die bedarfsgerechte Anlagenflexibilisierung
- Entwicklung weitgehend emissionsfreier Kesseltechnik
- Einbindung von ORC-Anlagen, Turbinen und Vergasersystemen sowie (Mikro)-Kraft-Wärme-Kälte Kopplungsanlagen
- Verbesserung der Brennstoff- und Lastflexibilität von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlagen
- Erhöhung des Wirkungsgrades durch neue Materialien, Prozessoptimierung und innovative Kraftwerkskonzepte
- Verlängerung der Lebensdauer insbesondere der hochbelasteten Heißgaskomponenten in Bezug auf erhöhte Anzahl der Startvorgänge und Lastwechsel
- Reduktion der Herstellungskosten insbesondere der hochbelasteten Heißgaskomponenten
- Gasreinigungsverfahren zum Synthesegaseinsatz in Brennstoffzellen
- Tools zur Planung und Wirtschaftlichkeitsbeurteilung von Nahwärmenetzen mit Speichern auf Basis von Biomasse

### Jülich

Dr. Andreas Müller  
(Pflanzenwissenschaften)  
Tel.: 02461/61-3528  
a.mueller@fz-juelich.de

Dr. Michael Müller  
Tel.: 02461/61-6812  
mic.mueller@fz-juelich.de

Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten  
(Elektrochemische  
Verfahrenstechnik)  
Tel.: 02461/61-3076  
d.stolten@fz-juelich.de

### KIT

Prof. Dr. Nicolaus Dahmen  
Tel.: 0721/608-22596  
nicolaus.dahmen@kit.edu

Prof. Dr. Georg Müller  
(Vorbehandlung und Extraktion)  
Tel.: 0721/608-24669  
georg.mueller@kit.edu

Dr. Christine Rösch  
(Potenzialabschätzung,  
Bewertung)  
Tel.: 0721/608-22704  
christine.roesch@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Dieter Stapf  
(Biogene Energieträger)  
Tel.: 0721/608-29270  
dieter.stapf@kit.edu

### UFZ

Prof. Dr. Daniela Thraen  
Tel.: 0341/235-1267  
daniela.thraen@ufz.de

Dr. Sabine Kleinsteuber  
Tel.: 0341/235-1325  
sabine.kleinsteuber@ufz.de

PD Dr. Falk Harnisch  
(Elektrobiotechnologie)  
Tel.: 0341/ 235-1337  
falk.harnisch@ufz.de

### Wuppertal Institut

Dr. Karin Arnold  
(Systemanalyse)  
Tel.: 0202/2492-286  
karin.arnold@wuppertalinst.org

### ZAE Bayern

Prof. Dr.-Ing. Hartmut Spliethoff  
Tel.: 089/329442-0  
hartmut.spliethoff@zae-bayern.de

### ZSW

Dr. Michael Specht  
Tel.: 0711/7870-218  
michael.specht@zsw-bw.de

- Untersuchung der Möglichkeiten, Solarthermie in Nahwärmenetzen zur Substitution von Biomasse zu verwenden
- Auswirkungen einer verstärkten Biomassennutzung für Prozessenergie auf die Bereitstellung von Flexibilitätsoptionen im Strommarkt

#### **F&E zur Bereitstellung von Kraftstoff**

Biokraftstoffe stellen eine wichtige Alternative zu fossilen Kraftstoffen dar. Ihr CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial muss weiter ausgeschöpft und Nutzungskonkurrenzen müssen reduziert werden.

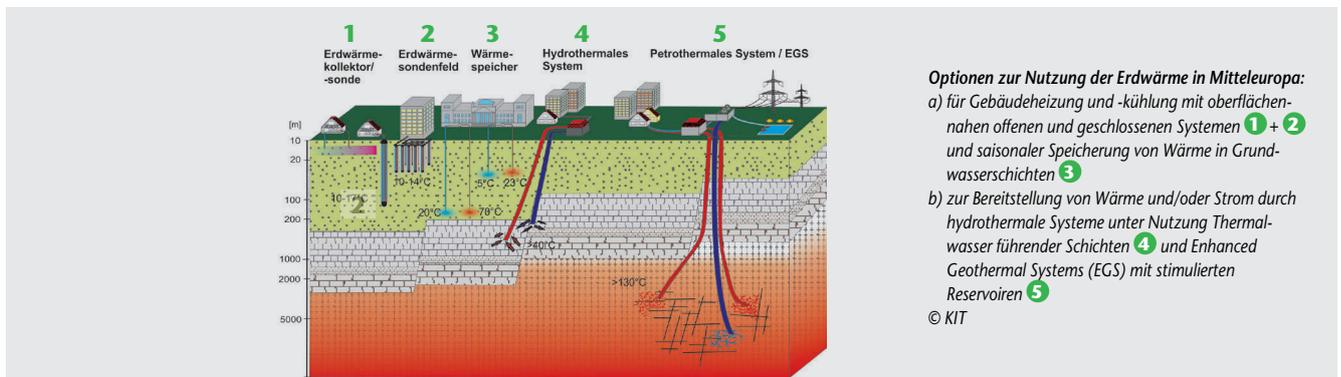
- hocheffiziente Kraftstoffbereitstellung in neuen Bioraffinerien
- bevorzugte Nutzung von Biomasse zweiter und auch dritter Generation
- Nutzung von erneuerbarem Strom und nachhaltigen C-Quellen
- fermentative Herstellung von Energieträgern
- Verfahren auf Basis von pflanzlichen Ölen und Reststoffen aus Industrie, Haushalten, Agrarproduktion, Forstwirtschaft und Algen
- Maximierung des Kohlenstoff-Nutzungsgrades bei der Kraftstofferzeugung
- Neue Gastrenn-, Gasreinigungs- und Gaskonditionierungsverfahren
- Entwicklung schadstoffresistenter, für den Rohstoff Biomasse angepasster Katalysatoren zur Gaskonditionierung und Kraftstoffsynthese
- Weiterentwicklung und Optimierung der Bioraffineriekonzepte
- Ökologische Bedeutung einer verstärkten Bereitstellung von Biotreibstoffen der ersten Generation als Kopplungsprodukte der Proteinherstellung

#### **F&E zur nachhaltigen Integration der stofflichen und energetischen Nutzung in die Biomasse-Produktionssysteme**

Biomasse dient als Ausgangsstoff vieler Wertschöpfungsketten. Die Forschung verfolgt eine gekoppelte, kaskadierende Nutzung. Auch bei einer energetischen Vornutzung können stofflich nutzbare Produkte anfallen.

- Energieträger / Prozessenergie aus Nebenprodukten stofflicher Prozesse
- Entwicklung neuer Koppel- und Kaskadennutzungspfade
- Integration der energetischen Nutzung in die Prozesse zur Verbesserung der Nachhaltigkeit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion (z. B. durch Kombination der Pflanzenölproduktion mit der Nutzung des eiweißhaltigen Presskuchens als Tierfutter)
- Prozesse zur Abtrennung von Nährstoffen und zum Schließen von Stoffkreisläufen
- Prozesse zur Abtrennung von Wertstoffen
- Integration neuer Wertschöpfungsketten in bestehende Bioenergieprozesse

## Geothermie (Strom, Wärme und Kälte)



- + Geothermie ist eine erneuerbare und umweltfreundliche Energiequelle.
- + Mit Geothermie kann sowohl Strom als auch Wärme oder Kälte bereitgestellt werden.
- + Tiefe Geothermie fluktuiert nicht und oberflächennahe Geothermie nur wenig. Somit kann Geothermie die Schwankungen anderer erneuerbarer Energien ausgleichen.

### Tiefe Geothermie

Tiefe Geothermie bezeichnet Bohrungen in 2–5 Kilometern Tiefe zur Versorgung größerer Wärmenetze und zur Bereitstellung von elektrischem Strom.

### Potenziale

Enhanced Geothermal Systems (EGS) werden in Mitteleuropa als Option mit dem größten Potenzial gesehen. Darunter versteht man tiefe geothermische Systeme, bei denen produktivitätssteigernde Maßnahmen im Reservoir durchgeführt werden, um eine wirtschaftliche Nutzung zu erreichen. Die enormen geothermischen Potenziale können mit sicherer Erkundung und Erschließung der Wärmequellen sowie hoher Effizienz der Übertageanlagen geschöpft werden.

### Kontakte

#### Fraunhofer ISE

Dr. Peter Engelman  
(Wärmenetze)  
Tel.: 0761/4588-5129  
peter.engelmann@ise.fraunhofer.de

#### GFZ

Prof. Dr. Ernst Huenges  
Tel.: 0331/288-1440  
huenges@gfz-potsdam.de

#### KIT

Prof. Dr. Thomas Kohl  
Tel.: 0721/608-45220  
thomas.kohl@kit.edu

#### UFZ

JProf. Dr. Haibing Shao  
Tel.: 0341/235-1884  
haibing.shao@ufz.de

#### ZAE Bayern

Dr. Jens Kuckelkorn  
Tel.: 089/329442-17  
jens.kuckelkorn@zae-bayern.de

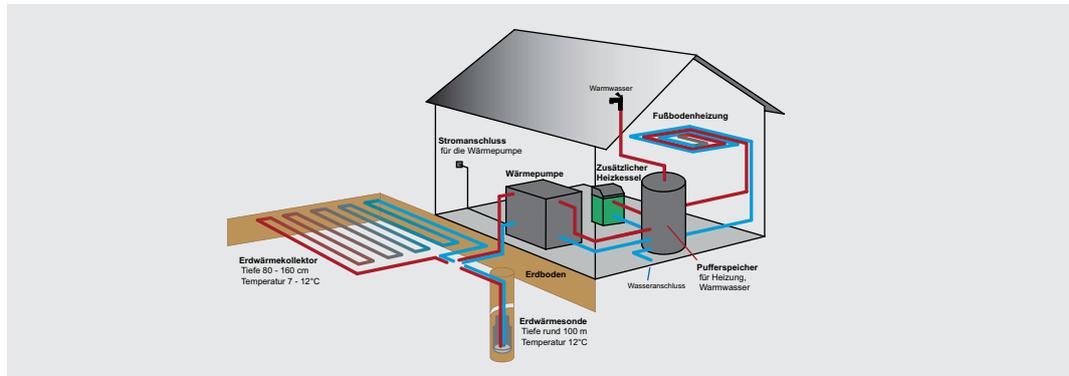
### Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Ziel ist es, die EGS-Technologie von der vorwettbewerblichen Demonstration zur Marktreife zu führen. Schlüsselthemen dabei sind:

- **Minimierung des Fündigkeitsrisikos**  
Verbesserte Erkundungsmethoden tragen dazu bei, die spezifischen Gesteins- und Reservoireigenschaften genauer vorherzusagen und das Fündigkeitsrisiko zu minimieren.
- **Sicherstellung einer nachhaltigen Lagerstättenproduktivität**  
Wirtschaftliche Fließraten sollen durch Verfahren zur künstlichen Erhöhung der Produktivität eines geothermischen Reservoirs nach dem EGS-Konzept bei minimalen Umweltauswirkungen erreicht werden.

- **Gewährleistung eines effizienten und nachhaltigen Anlagenbetriebs**  
Die Systemverlässlichkeit einer Gesamtanlage muss betriebsbegleitend und in Forschungsinfrastrukturen getestet und schrittweise hin zu hoher Effizienz und Verfügbarkeit weiterentwickelt werden. Die Entwicklung von Planungssoftware ist ein Werkzeug zur standortspezifischen Optimierung der Wirtschaftlichkeit von Geothermiekraftwerken.
- **Entwicklung von Prozessverständnis**  
Als Basis für technologische Entwicklungen und eine effiziente, sichere und langlebige Auslegung der Anlage ist ein vertieftes Verständnis der Prozesse im Reservoir und im übertägigen Teil des Thermalwasserkreislaufes notwendig. Hierfür spielen numerische multiphysikalische Simulationen eine wichtige Rolle. Versuche in Untertagelaboratorien sind notwendig, um die komplexen Prozesse in situ beobachten und beschreiben zu können.

**Nutzungssysteme der oberflächennahen Geothermie:**  
Erdwärmesonde und Kollektor  
© Stober & Bucher:  
Geothermie (2014)



## Kontakte

### Fraunhofer IEE

Dr. Dietrich Schmidt  
(Wärmenutzung, Gesamtsystem-  
betrachtung)  
Tel.: 0561/804-1871  
neu: dietrich.schmidt@  
iee.fraunhofer.de

### Fraunhofer ISE

Dr. Constanze Bongs  
(Kühlung und Klimatisierung  
von Gebäuden)  
Tel.: 0761/4588-5487  
constanze.bongs@  
ise.fraunhofer.de

### GFZ

Prof. Dr. Ernst Huenges  
Tel.: 0331/288-1440  
huenges@gfz-potsdam.de

### ISFH

Fabian Hüsing  
Tel.: 05151/999-645  
huesing@isfh.de

### KIT

Prof. Dr. Ingrid Stober  
0721/608-45488  
ingrid.stober@kit.edu

### UFZ

Dr. Thomas Vienken  
Tel.: 0341/235-1382  
thomas.vienken@ufz.de

### Prof. Dr. Haibing Shao

Tel.: 0341/235-1884  
haibing.shao@ufz.de

### ZAE Bayern

Dr. Jens Kuckelkorn  
Tel.: 089/329442-17  
jens.kuckelkorn@zae-bayern.de

## Oberflächennahe Geothermie und Umweltwärme

Oberflächennahe Geothermie kann verschieden genutzt werden: als Wärmequelle in Verbindung mit Wärmepumpen zur Beheizung von Einzelgebäuden und Stadtquartieren oder als Wärmesenke für die Kühlung von Gebäuden. Ein wesentlicher Vorteil ist, dass oberflächennahe Geothermie mit verhältnismäßig geringem Aufwand erschlossen werden kann und nahezu flächendeckendes Anwendungspotenzial in Neubau und Bestand besitzt.

### Saisonale Wärme- oder Kältespeicherung

Zur saisonalen Wärmespeicherung wird Wasser aus einem Aquifer entnommen und erwärmt. Anschließend wird das erwärmte Wasser zur Speicherung in dasselbe oder ein räumlich getrenntes Reservoir eingebracht. Wärme zur Beladung kann aus verschiedenen Quellen stammen; z. B. Abwärme aus Industrie oder Gebäude-

kühlung, Solarthermie, Power2Heat oder stromgeführte Blockheizkraftwerke. Zur Entladung wird die Pump- richtung umgedreht, die Wärme (z. B. mittels Wärmetauscher) entzogen und erforderlichenfalls mittels Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau gehoben. Für die saisonale Wärme- und Kältespeicherung werden zunehmend auch geschlossene Systeme (z. B. Erdwärmesonden) genutzt.

- + Die Nutzung geothermischer Wärmespeicher kann die kostengünstige Erschließung dringend benötigter großer Speicherkapazitäten für erneuerbare Wärmeversorgungskonzepte realisieren und sommerliche Überschusswärme in den Winter für Heizzwecke transferieren.
- + Als Reservoir großer Wärmekapazität kann das Erdreich die Angebotsschwankungen volatiler Erzeuger (z. B. Solarthermie) ausgleichen. Im oberflächennahen Bereich können so bodengestützte Wärmepumpensysteme effizient unterstützt werden.

## Forschungs- und Entwicklungsbedarf

### Oberflächennahe Geothermie

Systeme der oberflächennahen Geothermie mit Erdwärmesonden und Wärmepumpen sollen noch effizienter und umweltsicherer werden. Nötig sind:

- **Nachhaltige Untergrundnutzung**  
Negative Effekte bei Bau und Betrieb müssen durch Anwendung verlässlicher Erkundungs- und Beobachtungsmethoden, qualifizierter Bauausführung sowie geeigneter Wärmemanagementkonzepte minimiert werden.
- **Systemoptimierung unter- und übertage**  
Höhere Betriebssicherheit und insbesondere höhere Arbeitszahlen werden sowohl durch Verbesserung an den Erdwärmesonden als auch in der Systemaus-

legung und Verteilung von Wärme/Kälte in Gebäuden erreicht. Die Kombination regenerativer elektrischer und thermischer Energie mit Wärmepumpen und geothermischen Anlagen ermöglicht effiziente und umweltschonende Wärmeversorgungssysteme; erfordert allerdings optimierte Komponenten und Regelungsstrategien

### Aquiferspeicherung von Wärme/Kälte

- **Integration von Wärme- und Kältespeichern**  
Das volkswirtschaftlich relevante hohe Speicherpotenzial soll nutzbar gemacht werden. Insbesondere muss aufgrund der sehr langen Be- und Entladungszeiten die Integration in Energieversorgungssysteme verbessert werden.

## Meeresenergie



*Gezeitenströmungskraftwerk „SeaGen“, Leistung 1,2 MW  
Quelle: Fraunhofer IEE*

Der Tidenhub der Gezeiten ermöglicht den Einsatz konventioneller Wasserturbinen zur Stromerzeugung. Zurzeit sind weltweit Anlagen mit insgesamt etwa 523 MW elektrischer Leistung installiert.

Wellenenergie beruht auf der Wechselwirkung zwischen der Meeresoberfläche und dem Wind. Das technische Potenzial in Europa wird auf über 1200 TWh/a geschätzt.

Meeresströmungen werden in Küstennähe vor allem durch die Gezeiten verursacht. Unter geeigneten topologischen Bedingungen kann die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers für eine kommerzielle Stromerzeugung genutzt werden. Das weltweite technische Potenzial wird auf etwa 1500 TWh/a geschätzt, knapp 10% davon in Europa.

Die europäische Meeresenergiebranche erwartet bis 2020 die Installation von Anlagen mit einer Gesamtleistung von rund 300 MW, etwa zwei Drittel davon entfallen auf Gezeitenströmungen.

Das Potenzial maritimer Energiequellen für den deutschen Küstenbereich ist vergleichsweise gering. Die Technologien zur Nutzung dieser Energiequellen haben aber auch für Deutschland langfristige Bedeutung: Die deutsche Anlagentechnik ist ein wertvoller Exportfaktor, und die andernorts so bereitgestellte nachhaltige Energie kann als Strom oder synthetischer Energieträger nach Deutschland importiert werden. In Deutschland sind mehrere Universitäten sowie Forschungsinstitute und mittelständische Industrieunternehmen, aber auch Großkonzerne und große Energieversorger im Meeresenergiesektor aktiv.

### Kontakte

#### *Fraunhofer IEE*

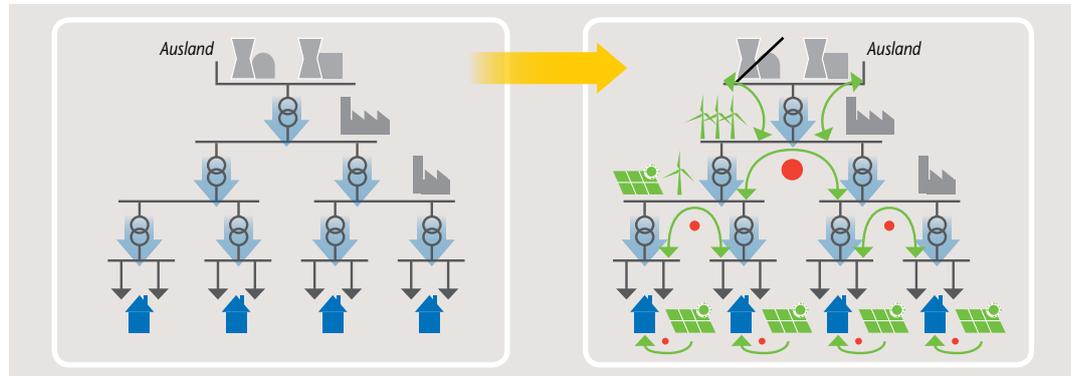
*Jochen Bard  
Tel.: 0561/729-346  
jochen.bard@iee.fraunhofer.de*

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Im Vergleich zur Windenergie stehen die Meeresenergie-Technologien noch am Anfang. Neben einer Anzahl von Demonstrationsanlagen befinden sich erste kleine Anlagenparks im Bau. Ziel ist es, die erheblichen vorhandenen Potenziale wirtschaftlich nutzbar zu machen. Dazu ist die Skalierung der Anlagenleistungen erforderlich, sowie die Identifizierung und gezielte Förderung der vielversprechendsten Technologien und Anlagenkonzepte, ebenso wie eine vertiefte Vernetzung der Forschung und der Industrie.

## Stromnetze

**Transformation der Stromnetze:**  
links: unidirektionales  
hierarchisches Versorgungssystem  
rechts: zelluläres System mit  
intelligenten Netzbetriebsmitteln  
auf allen Ebenen  
(● = Speicher)



### Kontakte

#### DLR

Dr. Karsten von Maydell  
Tel.: 0441/99906-210  
karsten.maydell@dlr.de

Dr. Thomas Vogt  
Tel.: 0441/99906-103  
t.vogt@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Prof. Dr. Kurt Rohrig  
(Europäische Szenarien und  
Netzausbauplanung)  
Tel.: 0561/7294-330  
kurt.rohrig@iee.fraunhofer.de

Dr. Philipp Strauß  
(Netzplanung, Netzbetrieb,  
Netzregelung, Netzdynamik)  
Tel.: 0561/7294-144  
philipp.strauss@iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Dr.-Ing. Niklas Hartmann  
(Kraftwerkeinsatzplanung  
und Betriebsstrategien)  
Tel.: 0761/4588-5730  
niklas.hartmann@ise.fraunhofer.de

#### IZES

Eva Hauser  
Tel.: 0681/844 972-45  
hauser@izes.de

#### KIT

Prof. Dr. Veit Hagenmeyer  
Tel.: 0721/608-29200  
veit.hagenmeyer@kit.edu

Prof. Dr. Thomas Leibfried  
Tel.: 0721/608-42912  
thomas.leibfried@kit.edu

#### Wuppertal Institut

Frank Merten  
(Systemanalyse)  
Tel.: 0202/2492-126  
frank.merten@wupperinst.org

Stromnetze entwickeln sich zur wichtigsten Säule zum Austausch von Energie. Sie verbinden Erzeugungs-, Speicher- und Verbrauchsinfrastrukturen auf allen Netzebenen miteinander. Hochspannungsnetze transportieren Energie mit hoher Leistung und verlustarm über weite Distanzen und eignen sich daher besonders für den überregionalen Energieaustausch. Verteilungsnetze stellen die Verbindungen zu den urbanen und industriellen Verbrauchern her und machen ca. 98 Prozent des gesamten deutschen Stromnetzes aus.

Stromnetze waren ursprünglich so konzipiert, dass die in wenigen zentralen Kraftwerken erzeugte Leistung dem sich ständig ändernden Bedarf der Verbraucher nachgeführt wurde. Eine stetig anwachsende Anzahl dezentraler Erzeuger in den Verteilnetzen führt jedoch dazu, dass die Betriebsführung zur Netzstabilisierung komplexer wird und die Mindestanforderungen (z. B. erweiterte Regelungsmöglichkeiten, Kommunikationstechnik) an dezentrale Erzeuger steigen, um einen sicheren Systembetrieb der Stromnetze gewährleisten zu können.

Erzeugung und Verbrauch müssen jederzeit in Balance sein. Frequenz und Spannung sind in engen Grenzen konstant zu halten, um Schäden an Verbrauchern zu vermeiden. Für die Stabilität der Stromnetze sorgen sogenannte Systemdienstleistungen wie Regelenergie zur Frequenzhaltung, Blindleistung zur Spannungshaltung, Versorgungswiederaufbau, Netzbetriebsführung.

Die Stromproduktion aus Wind und Sonne steigt signifikant und fluktuiert mit dem Wetter. Der Ausbau der Stromnetze in Deutschland und Europa trägt zum Ausgleich der Schwankungen bei und ermöglicht die Integration von dezentralen, volatilen Erzeugern. Dezentrale Erzeuger und Speicher mit Regelungsmöglichkeiten (autark oder auf Abruf) haben das Potenzial, die Kapazität des Stromnetzes optimal auszuschöpfen. Der Einsatz von nicht fluktuierenden erneuerbaren Energieerzeugern muss konsequent dann erfolgen (können), wenn ihre Vorteile (Speicherbarkeit von Brennstoff und teilweise

Kompensation volatiler Wind- und Solarkraft in der Strom- und Wärmeerzeugung) für das Energiesystem am größten sind.

Als Schnittstelle zwischen Stromerzeugung und Stromverbrauch besitzen Stromnetze ein zentrales Koordinierungspotenzial für das Stromversorgungssystem, das jedoch durch die organisatorische Trennung von Stromtransport und Stromerzeugung bzw. -handel (Unbundling) eingeschränkt wird. Die intelligente Vernetzung steuerbarer Erzeuger und Verbraucher sowie zunehmend auch Speicher durch moderne Informations- und Kommunikationstechnologien schafft die notwendige Flexibilität im System.

### Potenziale

Der im Rahmen der Energiewende notwendige Aus- und Umbau der Stromübertragungs- und -verteilnetze in den nächsten Dekaden bietet die Möglichkeit, Stromnetze stärker in den Fokus der Forschung zu rücken und dabei ihre systemische Bedeutung stärker anzuerkennen.

Das BMWi skizziert auf der Grundlage von Studien in dem Impulspapier „Strom 2030“ langfristige Trends für den Stromsektor, aus denen sich sowohl energiepolitische Aufgaben als auch Forschungsaufgaben für die kommenden Jahre ableiten lassen.

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Stromnetze

- Vermaschte Hochspannungs-Gleichstromsysteme
- Interaktion der Übertragungs- und Verteilungsebenen
- fortgeschrittene Prognoseverfahren zur verbesserten Steuerung von Verteilnetzen
- Informations- und Kommunikationssysteme inkl. Schnittstellendefinition für den Netzbetrieb (u. a. Online- und Prognoseverfahren für die Netzeinsatzplanung sowie bidirektionale Energiemanagement- und -handelssysteme für den Dialog zwischen Energieerzeugern, Verteilern und Verbrauchern)
- Stromnetze als „Internet der Energie“ (Transport von Energie UND Informationen)
- intelligente und flexible Netzbetriebsmittel
- Steuer- und Regelstrategien für intelligente Komponenten, Konzepte und Wirkungen von smart grids
- Regelung stromrichterdominierter Netze
- Standardisierung der Schnittstellen und Charakterisierung der Technologien für die Planung und Wartung flexibel erweiterbarer Systeme
- Energiemanagement und Managementzentralen für die Wartungsoptimierung vieler verteilter Einzelanlagen
- neue Netzmanagementsysteme und Netzregelungsverfahren für die technische, ökonomische und ökologische Optimierung (für alle Techniken und Netzebenen einschließlich der Niederspannungsebene)
- Netzwiederaufbau unter Berücksichtigung erneuerbarer Energie
- Management von Teilnetzbildung im Störbetrieb
- Betriebssicherheit von kritischen Infrastrukturen
- Systemdienstleistungen von Erneuerbare-Energie-Anlagen und Lasten
- Werkzeuge für die Netzplanung und den Netzbetrieb
- Analyse des solaren Strahlungsfeldes für eine optimierte Netzplanung und Netzbetriebsführung
- Simulation von Netzen, Erzeugern, Verbrauchern und Speichern
- Speichertechnologien, die sich robust in die Netzinfrastruktur einbetten
- Bewertungsverfahren für die Planung und den Einsatz verschiedener Speichertechnologien im gesamten Stromnetz
- Bereitstellung hoher Leistungen, z. B. durch Schwungräder, Super-Caps und supraleitende Spulen
- zukunftsfähige Anpassung der Netzbepreisung (Netznutzung durch Stromeinspeiser und -nutzer) unter Beachtung von Gerechtigkeits- und Verteilungsaspekten

#### ZAE

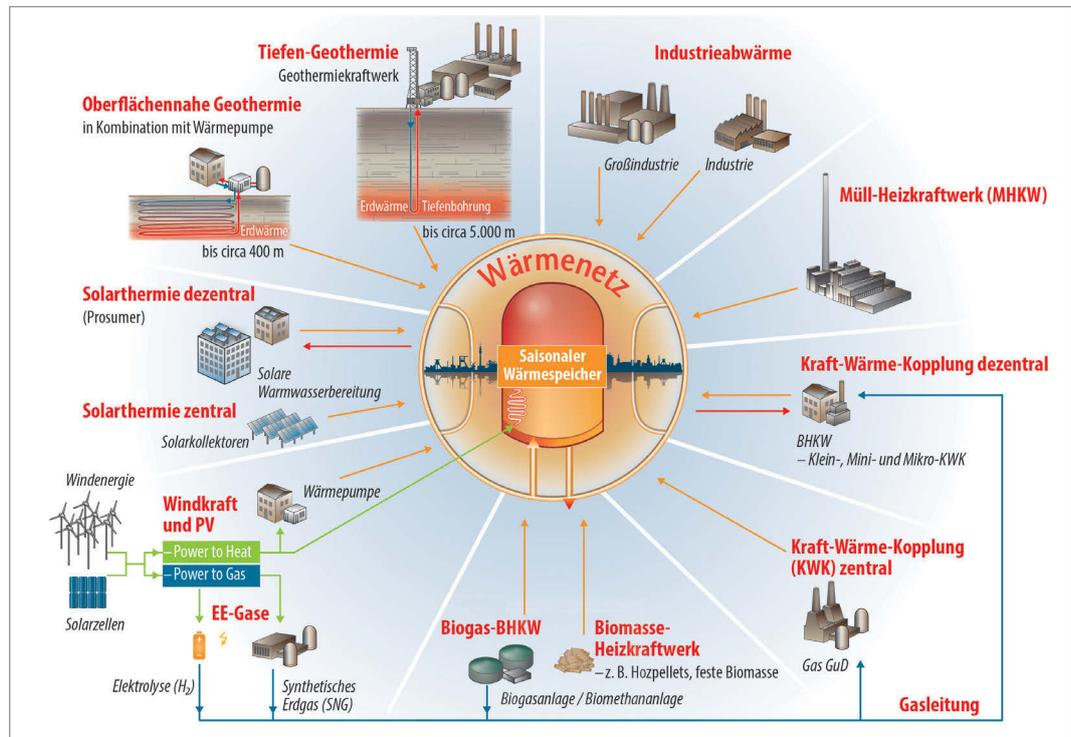
Christoph Stegner  
Tel.: 09131/9398-401  
christoph.stegner@zae-bayern.de

#### ZSW

Dr. Jann Binder  
Tel.: 0711/7870-209  
jann.binder@zsw-bw.de

## Wärmenetze

Das Wärmenetz  
als infrastruktureller Baustein einer  
kommunalen Wärmewende  
© Wuppertal Institut, Vislab 2015



### Kontakte

#### DBFZ

Dr.-Ing. Volker Lenz  
Tel.: 0341/2434-450  
volker.lenz@dbfz.de

#### DLR

Prof. Dr. André Thess  
Tel. 0711/6862-358  
andre.thess@dlr.de

Carsten Hoyer-Klick  
Tel. 0711/6862-278  
carsten.hoyer-klick@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Dr. Dietrich Schmidt  
(Quartierslösungen, Nieder-  
temperaturfernwärmesysteme)  
Tel.: 0561/804-1871  
dietrich.schmidt@  
iee.fraunhofer.de

#### ISFH

Prof. Oliver Kastner  
Tel.: 05151/999-525  
kastner@isfh.de

#### IZES

Bernhard Wern  
Tel.: 0681/844 972-74  
wern@izes.de

#### KIT

Prof. Dr.-Ing. Thomas Kolb  
Tel.: 0721/608-42560  
thomas.kolb@kit.edu

#### Wuppertal Institut

Dietmar Schüwer  
(Systemanalyse)  
Tel.: 0202/2492-288  
dietmar.schuewer@wupperinst.org

#### ZAE

Lars Staudacher  
Tel. 089/329442-41  
lars.staudacher@zae-bayern.de

Es gibt vielfältige Ansätze für Wärmenetze, die sich nach Länge der Netze, Wärmeträgermedien, Temperaturniveaus und Betriebsweisen unterscheiden lassen. An einer Wärmequelle wird ein Wärmeträgermedium (z. B. Wasser) auf die gewünschte Temperatur erwärmt und dann über ein Rohrleitungssystem mittels Pumpen verteilt. Beim Nutzer wird das Wärmeträgermedium entweder direkt in die Heizgeräte geleitet oder die Wärme wird über einen Wärmetauscher an das Objekt übergeben. Das abgekühlte Wärmeträgermedium des Verteilnetzes wird dann zurück zum Wärmeerzeuger geleitet, um erneut aufgeheizt zu werden.

Wärme ist zwar die Energieform mit den tendenziell größten Leitungsverlusten, aber die Effizienz der Wärmebereitstellung steigt mit größeren Erzeugereinheiten, insbesondere auch im Bereich der gekoppelten Strom-Wärme-Bereitstellung. Zusätzlich können Wärmenetze die Effizienz von Industrieprozessen durch die Nutzbarmachung von Abwärme in energetischen Nachbarschaften erhöhen. Ein deutlicher Ausbau der erneuerbaren Wärmeversorgung in einer verstärkten Kopplung mit der erneuerbaren Strombereitstellung wird insbesondere in Ballungsgebieten auf der Bündelung der Wärmeerzeugung über Wärmenetze basieren.

Die erfolgreiche Umsetzung der Wärmewende wird also auch von einem intelligenten Einsatz von Wärmenetzlösungen abhängen.

Vorteile von Wärmenetzen sind:

- + Wärmenetze bieten die Chance, verschiedene erneuerbare Wärmeoptionen (Solarthermie, Geothermie, Abwärme, Wärme aus erneuerbarem Überschussstrom und Wärme aus Biomasse) in der effizientesten und effektivsten Weise zu kombinieren und so eine ganzjährig sichere Versorgung mit überschaubaren Kosten zu garantieren.
- + Die größeren Einheiten ermöglichen effizientere und kostengünstigere Großwärmespeicher sowie Wärmeerzeuger und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen
- + Ausgleich von Bedarfsschwankungen
- + niedrigere spezifische Emissionen durch die bessere Technik in größeren Anlagen
- + Platzeinsparung in den angeschlossenen Einzelobjekten
- + Zusätzliche Flexibilitätsoption für das zukünftige gekoppelte Energiesystem durch Erschließung des Lastausgleichspotenzials von Wärmeverbrauchern

### Potenziale

Gerade in Ballungsgebieten werden Wärmenetze eine zentrale Bedeutung gewinnen, um hohe Anteile an erneuerbarer Wärme über das ganze Jahr verteilt mit hoher Effizienz einsetzen zu können. Das technische und wirtschaftliche Potenzial hängt sehr stark von ökonomischen und rechtlichen Rahmenbedingungen sowie der Entwicklung bei der Gebäudedämmung ab.

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Wärmenetze

- Integration von niederkalorischer Wärme (Solarthermie, industrielle Abwärme und Abwärme aus kommunalen Abwässern) in Wärmenetze
- Konversion fossil versorgter Hochtemperatur-Wärmenetze zu Niedertemperatur-Netzen unter Einbindung erneuerbarer Energien und Abwärme
- Entscheidungshilfen zur Abwägung von Wärme-/Kältenetzen im Vergleich zu Einzelversorgungslösungen
- Auswahlhilfen für die jeweils beste Wärme-/Kältenetzlösung unter Berücksichtigung demografischer Entwicklungen
- Ausbau von Wärmenetzen und deren Wirtschaftlichkeit vs. Reduzierung des Wärmebedarfs durch bessere Isolierung.
- Innovative Wärmenetzkonzepte (z. B. kalte Netze, Low-Ex-Konzepte, Netze mit zeitlich variierendem Temperaturniveau, Flexibilisierbarkeit der Netzinfrastruktur)
- Stärkung von Akzeptanz und Nutzungsbereitschaft für Wärme-/Kältenetze
- einfach zu bedienende Auslegungs- und Simulationswerkzeuge für Wärmenetze
- Entwicklung interaktiver und webbasierter IKT-Werkzeuge zur Planung von Wärmenetzen

**DBFZ**

Kerstin Wurdinger  
Tel.: 0341/2434-427  
kerstin.wurdinger@dbfz.de

**DLR**

Carsten Hoyer-Klick  
Tel.: 0711/6862-728  
carsten.hoyer-klick@dlr.de

Dr. Karsten von Maydell  
Tel.: 0441/99906-210  
karsten.maydell@dlr.de

Prof. Dr. André Thess  
Tel.: 0711/6862-358  
andre.thess@dlr.de

Dr. Thomas Vogt  
Tel.: 0441/99906-101  
t.vogt@dlr.de

**Fraunhofer IEE**

Dr. Reinhard Mackensen  
(Sektorkopplung, Integration EE  
in Regionen)  
Tel.: 0561/7294-245  
reinhard.mackensen@  
iee.fraunhofer.de

Dr. Dietrich Schmidt  
(Gebäude- und Quartierskonzepte)  
Tel.: 0561/804-1871  
dietrich.schmidt@iee.fraunhofer.de

**Fraunhofer ISE**

Prof. Dr. Christof Wittwer  
(Intersektorale Energiesysteme und  
Netzintegration)  
Tel.: 0761/4588-5115  
christof.wittwer@ise.fraunhofer.de

**ISFH**

Matthias Littwin  
Tel.: 05151/999-505  
littwin@isfh.de

**IZES**

Dr. Bodo Groß  
Tel.: 0681/844 972-51  
gross@izes.de

**Jülich**

Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten  
Tel.: 02461/61-3076  
d.stolten@fz-juelich.de

**KIT**

Dr.-Ing. Frank Graf  
(Gasinfrastruktur, Erzeugung  
EE-Gase, Sektorkopplung)  
Tel.: 0721/608-42561  
frank.graf@kit.edu

Prof. Dr. Veit Hagenmeyer  
Tel.: 0721/608-29200  
veit.hagenmeyer@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Dieter Stapf  
Tel.: 0721/608-29270  
dieter.stapf@kit.edu

**Wuppertal Institut**

Frank Merten  
(Systemanalyse)  
Tel.: 0202/2492-126  
frank.merten@wupperinst.org

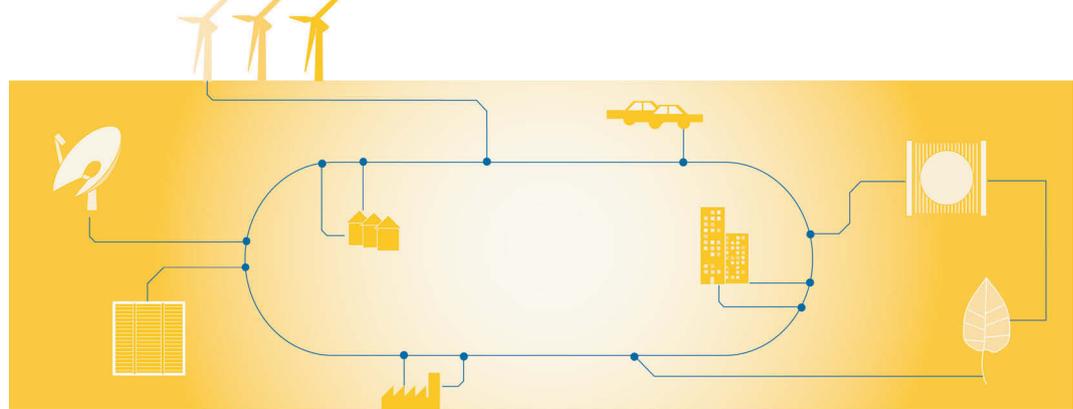
**ZAE Bayern**

Dr. Andreas Hauer  
Tel.: 089/329442-16  
andreas.hauer@zae-bayern.de

**ZSW**

Maika Schmidt  
Tel.: 0711/7870-232  
maika.schmidt@zsw-bw.de

## Systemintegration und Sektorkopplung



Energiesystem mit Vielzahl von Erzeugern und Verbrauchern © FVEE

Während viele Einzeltechnologien der Energiewende heute schon weitgehend technisch verfügbar sind, werden jetzt erst langsam die großen Herausforderungen bei ihrer Integration in ein zunehmend sektorübergreifendes Gesamtenergiesystem deutlich. Strategien für die nächsten Phasen der Energiewende müssen zunehmend eine ganzheitliche Betrachtung des Energiesystems mit Verknüpfungen der Wärme-, Strom- und Mobilitäts-sektoren in den Blick fassen. Sie betreffen die Versorgung eines einzelnen Gebäudes über Quartiere bis hin zu Regionen. Dafür braucht es Instrumente zur Bewertung der Rolle von Einzeltechnologien im Gesamtenergiesystem Strom-Wärme-Mobilität, wobei technologische, energetische, ökologische und ökonomische Aspekte zu berücksichtigen sind.

Bisher zeigen jedoch viele Ansätze zur Kombination und Systemintegration sowohl ökonomisch als auch energetisch eher niedrige Gesamteffizienzen. Dies ist vor allem auf nicht optimal abgestimmte Systemkomponenten und verbesserungsbedürftige Regelsysteme

zurückzuführen. Um die sich aus der Kombination der verschiedenen erneuerbaren Energieträger ergebenden Vorteile auszuschöpfen, müssen zum einen die Systemkomponenten für die Teilanwendungen optimiert und leicht verschaltbar gestaltet werden.

Bedingt durch die Notwendigkeit von Energiespeicherefunktionen sowie Last- und Erzeugungsmanagement rückt ein Zusammenspiel der Stromnetze mit thermischen Energienetzen und Netzen bzw. Speichern chemischer Energieträger (Gas, Wasserstoff etc.) in den Fokus, auf das die Systemtechnik von Erzeugern und Verbrauchern eingerichtet sein muss.

### Systemintegration bzw. Sektorkopplung bieten wichtigen Nutzen:

- + Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen
- + Verringerung der Gesamtinvestitionen in erneuerbare Energieerzeuger und Netze
- + Gewährleistung einer hohen Versorgungssicherheit, da die zunehmende Dynamik in den Energienetzen durch Kompensationsmöglichkeiten gedämpft wird

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Es besteht ein umfassender F&E-Bedarf zur Untersuchung systemtechnischer Fragestellungen der Sektorkopplung:

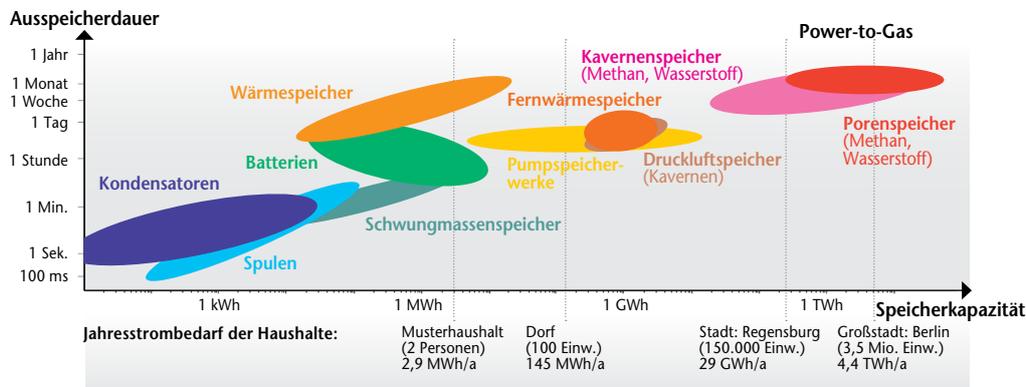
- Potenziale und Systemansätze für die sinnvolle Kopplung der Sektoren Strom, Wärme, chemische Energieträger und Mobilität
- praxisnahe Methoden für die technische Planung der Systemintegration/Sektorkopplung (u. a. Beschreibung und Darstellung der komplexen Systeme, Systemoptimierung, Variantenbewertung)
- Steuer- und Regelstrategien für intelligente Komponenten der Sektorkopplung
- Entwicklung und Standardisierung intelligenter und flexibler Verbundsystemregler und Netzbetriebsmittel (sowohl Hardware als auch Konzepte)
- Verknüpfung der Energienetze (Strom, Wärme, Gas)

- Power-to-X Anwendungen und Konzepte (vgl. Kap. Energiespeicher und Energiewandler)
- Konvergenzmöglichkeiten von Strom- und Gasnetzen zur Erschließung von Power-to-Gas-Potenzialen
- im Strom-Wärme-Mobilitäts-System praktische Erprobung von Technologien und Betreibermodellen für Sektorkopplung in „Living Labs“

Weiterer F&E-Bedarf besteht für:

- EE-Einspeisezeitreihen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung für die Netz- und Systemmodellierung
- Entwicklung von Open-Source-Stromnetzmodellen und Simulation großer Netzwerke
- Geoinformationssystem-basierte Modelle zur Optimierung von städtischen Energieinfrastrukturen
- Bewertung des Systemverhaltens in Abhängigkeit der räumlichen Verteilung von Erneuerbaren und Flexibilitätsoptionen sowie der Netzstruktur

# Energiespeicher



Übersicht verschiedener Speichertechnologien nach Speicherdauer und Kapazität. (Grafik nach Sterner und Thema; FENES, OTH Regensburg, 2014)

Energiespeichern kommt im zukünftigen Energiesystem eine Schlüsselrolle zu, da sie eine räumliche und zeitliche Anpassung von Energiebereitstellung und Energiebedarf ermöglichen:

- + Die schwankende Verfügbarkeit von Strom aus Photovoltaik und Windenergie wird durch Speicher ausgeglichen, so dass die Versorgung sichergestellt wird und erneuerbare Energien in das Gesamtsystem zur Strom- und Wärmeversorgung integriert werden können.
- + Die Energieeffizienz des Gesamtsystems wird gesteigert, wenn bislang ungenutzte Abwärme mit thermischen Speichern nutzbar gemacht wird.
- + Aktuell nicht gebrauchte Leistung muss nicht ungenutzt abgeregelt werden, stattdessen kann die akkumulierte Energie zu einem späteren Zeitpunkt verwendet werden.
- + Industrie- und Kraftwerksprozesse können mit thermischen und elektrischen Speichern flexibilisiert werden, sodass sie besser systemdienlich betrieben werden können.

Übersicht verschiedener Speichertechnologien nach Kapazität, Leistung, Wirkungsgrad und Speicherdauer. Die Daten sind als Orientierungswerte zu verstehen, da bei vielen Energiespeichern die aktuellen Randbedingungen einen entscheidenden Einfluss haben.

Speicher-Technologie	Kapazität kWh/t	Leistung MW	Wirkungsgrad	Speicherdauer
<b>Mechanisch</b>				
Pumpspeicherwerke	1	1 bis 500	80%	Tag bis Monat
Druckluftspeicher	2 kWh/m <sup>3</sup>	10 bis 300	40 bis 70%	Stunde bis ½ Tag
<b>Elektrochemisch</b>				
Bleisäurebatterien	40		85%	Tag bis Monat
Li-Ionen-Batterien	~ 160	0,002 bis einige 10	bis 95% auf Systemebene	¼ Stunde bis Tag(e)
Na-Ionen-Batterien	20 bis 30	0,002 bis einige 100 kW	80 bis 90%	
NaS-Batterien	110	0,05 bis ??	85%	Tag
Redox-Flow-Batterien	25	0,1 bis 10	75%	Tag bis Monat
<b>Thermisch</b>				
Sensible Niedertemperaturspeicher (Wasserspeicher)	10 bis 50 (für ° T = 10 bis 50K)	0,001 bis 10	50 bis 90%	Tag bis Jahr
Sensible Hochtemperaturspeicher (Flüssigsalz, Feststoff)	50 bis 150 (für ° T = 200 ... 500K)	5 bis 300	bis 95%	Stunde bis Tag
Latent-Wärmespeicher (Hochtemperatur)	50 bis 75	0,3 bis 6	90 bis 95%	Stunde bis Woche
Thermochemische Speicher	120 bis 250	0,01 bis 1	100% (Wärmepumpeneffekt)	Stunde bis Monate
<b>Chemisch</b>				
Wasserstoff/Methan	10.000 bis 33.300 (!)	0,001 bis 100	25* bis 65%	Tag bis Jahr

\*) inklusive Rückverstromung

## Kontakte

## DLR

Prof. Dr. André Thess  
Tel.: 0711/6862-358  
andre.thess@dlr.de

Prof. Dr. K. Andreas Friedrich  
Tel.: 0711/6862-278  
andreas.friedrich@dlr.de

## Fraunhofer IEE

Matthias Puchta  
(Batteriesysteme, Simulation,  
Hardware-in-the-Loop)  
Tel.: 0561/7294-367  
matthias.puchta@iee.fraunhofer.de

## Fraunhofer ISE

Dr.-Ing. Matthias Vetter  
(Batteriesysteme)  
Tel.: 0761/4588-5600  
matthias.vetter@ise.fraunhofer.de

Dr. Daniel Biro  
(Batteriezelltechnologie)  
Tel.: 0761/4588-5246  
daniel.biro@ise.fraunhofer.de

## ISFH

Michael Knoop  
(Elektrische Energiesysteme)  
Tel.: 05151/999-505  
knoop@isfh.de

Matthias Littwin  
(Elektrische Energiesysteme)  
Tel.: 05151/999-505  
littwin@isfh.de

## IZES

Dr. Bodo Groß  
(Arbeitsfeld Technische Innovationen)  
Tel.: 0681/844-972-51  
gross@izes.de

## Jülich

Prof. Dr. Rüdiger-A. Eichel  
(Elektrochemie)  
Tel.: 02461/61-4644  
r.eichel@fz-juelich.de

Prof. Dr. Olivier Guillon  
(Werkstoffe)  
Tel.: 02461/61-5181  
o.guillon@fz-juelich.de

## KIT

Prof. Dr. Maximilian Fichtner  
(Materialien)  
Tel.: 0721/608-25340  
maximilian.fichtner@kit.edu

Prof. Dr. Ellen Ivers-Tiffée  
(elektrochemische Charakterisierung  
und Modellierung)  
Tel.: 0721/608-47490  
ellen.ivers-tiffee@kit.edu

Prof. Dr. Marc Kamlah  
(Mechanik elektrochem. Energiespeicherung)  
Tel.: 0721/608-25860  
marc.kamlah@kit.edu

## ZAE Bayern

Dr. Gudrun Reichenauer  
Tel.: 0931/70564-328  
gudrun.reichenauer@zae-bayern.de

Petra Dotzauer  
Tel.: 089/329442-42  
petra.dotzauer@zae-bayern.de

## ZSW

Dr. Harry Döring  
(Systeme und Sicherheit)  
Tel.: 0731/9530-506  
harry.doering@zsw-bw.de

Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens  
(Materialforschung, Elektroden und  
Zelldesign)  
Tel.: 0731/9530-612  
margret.wohlfahrt-mehrens@zsw-bw.de

Dr. Wolfgang Braunwarth  
(Industrielle Produktionsforschung)  
Tel.: 0731/9530-344  
wolfgang.braunwarth@zsw-bw.de

## Elektrische Energiespeicher

Galvanische Zellen (Batterien) speichern chemische Energie, die über Redox-Reaktionen in elektrische Energie gewandelt werden kann. Für wiederaufladbare Zellen müssen die Reaktionen reversibel, d. h. umkehrbar sein.

- + Stromspeicher tragen zur Versorgungssicherheit bei, da sie eine unterbrechungsfreie Stromversorgung, Notstrom und einen vom Stromnetz unabhängigen Schwarzstart ermöglichen.
- + Elektrochemische Energiespeicher sind aufgrund ihres hohen Energiewirkungsgrades und ihrer schnellen Reaktionszeiten optimal zur Pufferung von fluktuierenden Stromquellen wie Photovoltaik oder Windenergie geeignet.

- + Stromspeicher ermöglichen Mobilität auf Basis elektrischer Energie. Eine elektrifizierte Fahrzeugflotte könnte künftig auch als großer dezentraler Stromspeicher fungieren.
- + Stromspeicher bieten Regelleistung und Regelenergie (primär im Verteilnetz).
- + Außerdem gestatten sie netzferne Anwendungen mit Erneuerbaren in Inselnetzen.

## Potenziale

Der Batteriemarkt wächst derzeit um ca. 8% pro Jahr und wird 2019 einen Wert von 120 Mrd. Euro erreicht haben.

## F&amp;E für Batteriezellen, Batteriesystemtechnik und Sicherheit

Die Anforderungen an künftige Batterien sind je nach Anwendung und Einsatzprofil enorm: z. B. arbeiten Autobatterien bei Umgebungstemperaturen von minus 30 °C bis plus 60 °C mit einer Lebensdauer von mehr als 10 Jahren, bei hoher Zyklenfestigkeit, schnellladefähig und unter allen Bedingungen absolut sicher.

- Auswahl und Kombination der Materialien für Kathoden, Anoden und Elektrolyte bestimmen die Eigenschaften der Zellen wie Energie- und Leistungsdichte, Kosten, Lebensdauer sowie Sicherheit.
- Bis 2020 sind Systemkosten für die Serienproduktion von weniger als 150 €/kWh auf Batteriepackebene realistisch. Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es neben kostengünstigen Materialien einer verbesserten Batteriesystemtechnik mit optimiertem Modul- und Systemdesign, Batteriemagementsystemen mit optimierten Algorithmen zur Ladezustands- und Alarungsbestimmung sowie optimierter Lade- und Betriebsführungsstrategien, Wärmemanagement und Sicherheitsüberwachung für alle denkbaren Betriebszustände und Fehlerfälle.
- Entwicklung von Prüfstandards und -einrichtungen, mit denen Batterien von der Zelle bis zum kompletten Batteriesystem hinsichtlich Sicherheit und Betriebsverhalten überprüft werden können.
- Für die Durchsetzung am Markt spielt auch die Recyclingfähigkeit der Systeme eine Rolle.
- Herausforderung für die Forschung ist die Übertragung der bisherigen Lithium-Technologie für Handys und Laptops auf großskalige industrielle Batteriesysteme (einige 10 kWh für Batteriefahrzeuge bis einige 10 MWh für Batteriespeicherwerke). Ziel ist die Erhöhung der Energiedichte durch neue Elektrodenmaterialien. Dabei können Metall-Luft-Systeme (Zn, Li, Metall), Metall-Schwefel-Zellen oder multivalente Systeme wie Mg, Al, Zn eine Steigerung der Energiedichte um Faktor 2–5 im Vergleich zu heutigen Lithium-Ionen-Zellen ermöglichen (> 240 Wh/kg).
- Die absehbare Ressourcenproblematik bei einigen Batteriekomponenten macht die Erforschung und Entwicklung auch von Alternativsystemen auf der Basis nachhaltiger Materialien erforderlich (z. B. Na-, Mg-, Zn- und Al-Batterien).

- Festkörper-Batterien, bei denen eine Lithium-Ionen-leitende Keramik den flüssigen, organischen Elektrolyten ersetzt. Die Batterien enthalten damit keine brennbaren organischen Stoffe mehr haben eine höhere chemische Stabilität. Bei geeignetem Design erwartet man auch höhere Energiedichten als bei heutigen Lithium-Ionen-Batterien.
- Entwicklung von intelligenten Ladestationen für Elektroautos und Ertüchtigung der Fahrzeugbatterien für die Rückspeisung von Strom ins Netz
- Sicherheit von elektrischen Speichersystemen unter verschiedenen Betriebsbedingungen sowie bei Fehlbedienung und in Unfallsituationen

## F&amp;E für Superkondensatoren

- Für Superkondensatoren werden sowohl neue Systeme auf der Basis von NanoMaterialien entwickelt als auch Bauelemente für spezielle Anwendungen. Für reine Doppelschichtkondensatoren werden vor allem amorphe Kohlenstoffmaterialien eingesetzt. Dieser Materialtyp eignet sich aufgrund der exzellenten Einstellbarkeit wesentlicher Kenngrößen, wie Porosität, Porengröße, Oberfläche und Leitfähigkeit, über mehrere Zehnerpotenzen und der hohen chemischen Reinheit hervorragend als Modellmaterial.
- Synthese und Untersuchung neuer Hybridmaterialien für Superkondensatoren, die auf mikroskopischer Ebene sowohl Batterie- als auch Kondensatoreigenschaften zeigen.

## F&amp;E für Redox-Flow-Batterien

Redox-Flow-Batterien sind elektrochemische Energiewandler mit flüssigen, pumpfähigen aktiven Speichermedien. Leistung und Energiespeicherkapazität sind dadurch unabhängig voneinander skalierbar. Anwendung finden sie als hocheffiziente Speicher vor allem im stationären Bereich zum Lastausgleich bei schwankenden Energiequellen wie Wind und Sonne.

- Optimierung der eingesetzten elektrochemischen aktiven Materialien
- Optimierung des Elektrolyten
- Optimierte Stack- und Anlagendesigns für die zweistellige kW-Klasse und Multi-Stack-Ansätze insbesondere für größere Anlagen
- Optimierte Betriebsführungsstrategien z. B. zur Erhöhung des Systemwirkungsgrades sowie zur Erhöhung des nutzbaren SOC-Bereichs

## Thermische Energiespeicher



**Mobile Sorptionsspeicher** können Wärme speichern und transportieren, sodass Bereitstellung und Nutzung örtlich entkoppelt sind. Das Bild zeigt den Wechsel der Speicher-Container beim Wärmeabnehmer.  
© ZAE Bayern

Thermische Speichersysteme sind Schlüsselkomponenten für eine effektive Nutzung der zeitlich variabel verfügbaren Sonnenenergie für solarthermische Kraftwerke, Wärmerückgewinnungsprozesse, solare Nahwärmeprojekte, Gebäudeklimaanlagen und Brauchwassersysteme.

- + Bei solarthermischen Kraftwerken können durch Wärmespeicher die Verfügbarkeit erhöht und Stromgestehungskosten deutlich gesenkt werden. Fossile Kraftwerke können mittels Wärmespeichern flexibilisiert werden.
- + Bei industriellen Prozessen kann durch thermische Speichersysteme das Lastmanagement optimiert werden, so dass der spezifische Energieverbrauch gesenkt und die Energienutzungseffizienz gesteigert wird. Speichergestützte Power-to-Heat-Konzepte werden zunehmend eine wichtige Rolle in der Bereitstellung von Prozesswärme auch im höheren Temperaturbereich spielen.
- + Große Wärmespeicher erlauben die Pufferung von Überangeboten im Netz durch „Power to Heat“.
- + Wärmespeicher sind für den Ausbau von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlagen wesentlich, da

sie deren Strom- und Wärme- und Kälteerzeugung entkoppeln und somit die Integration der KWK-Anlagen in das Energiesystem vereinfachen.

- + Mit großen saisonalen Wärmespeichern kann in Deutschland etwa die Hälfte des Gesamtwärmebedarfs von größeren Gebäudeeinheiten solar gedeckt werden.
- + Teilsaisonale Speicher für Ein- und Mehrfamilienhäuser ermöglichen die Erhöhung des solarthermischen Deckungsanteils an der Wärmebereitstellung auf über 50% bis zu 100%. Hierzu sind kurzfristig die Wasserspeicher und mittelfristig PCM- und thermochemische Speicher weiter zu entwickeln. Kältespeicher spielen auch zur energieeffizienten Kühlung von Gebäuden eine wesentliche Rolle, da die Kälteerzeugung in Zeiten geringer Netzauslastung oder bei günstigeren Außentemperaturen erfolgen kann.
- + Auch die ohnehin vorhandene thermische Masse von Gebäuden kann durch gezielte Aktivierung technisch unaufwändig und kostengünstig als thermischer Speicher genutzt werden.

### F&E für Wärmespeicher

Künftige Wärmespeichertechnologien brauchen höhere Leistungsdichten und niedrigere Investitionskosten. Es besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf in Bezug auf Speichermedien, Speichertechnologien und Systemintegration:

- Entwicklung neuer Materialien mit höherer Funktionalität zur Kostenreduzierung (z. B. neue Phasenwechsel- und Sorptionsmaterialien mit geringen Speicherverlusten und höheren Energiedichten)
- Entwicklung spezifischer thermochemischer Systeme für hohe Speicherdichten und die Realisierung einer Wärmetransformation
- verbesserte und neue Speichermedien im Bereich hoher Temperaturen für solarthermische Kraftwerke und die bessere Nutzung industrieller Prozesswärme
- Gezielte Entwicklung von Simulationsmethoden für maßgeschneiderte Materialien, effiziente Speicher- und Prozessauslegung sowie Ermittlung von Umweltwirkungen

- Zyklenbeständigkeit und Leistungsbereitstellung bei den gewünschten Temperaturniveaus sind zu verbessern.
- Entwicklung verbesserter und hoch effizienter Techniken zur Wärmeein- und -auskopplung für die Realisierung des übergeordneten Ziels einer wirtschaftlichen Speichertechnik
- Demonstration von Hochtemperaturspeichern für die industrielle Prozesstechnik und die Kraftwerkstechnik als notwendiger Schritt zur kommerziellen Nutzung in diesem Bereich
- Standardisierung von Komponenten und Systemen kann zur Kostensenkung beitragen. Die korrekte Berücksichtigung von Speichern in Standards und Normen (z. B. Gebäude Richtlinien) ist für eine breitere Nutzung von Speichern notwendig.
- Die Integration von thermischen Speichern muss unter Berücksichtigung der Prozessanforderungen bewertet und optimiert werden, damit sie die Effizienz von Energiesystemen steigern.

### Kontakte

#### DLR

Dr. Alexander Dyck  
Tel.: 0441/99906-310  
alexander.dyck@dlr.de

Dr. Antje Seitz  
Tel.: 0711/6862-484  
antje.seitz@dlr.de

Prof. Dr. André Thess  
Tel.: 0711/6862-358  
andre.thess@dlr.de

#### Fraunhofer ISE

Stefan Gschwander  
(Wärme- und Kältespeicher)  
Tel.: 0761/4588-5494  
stefan.gschwander@ise.fraunhofer.de

Dr. Thomas Fluri  
(Hochtemperaturspeicher für Kraftwerke)  
Tel.: 0761/4588-5994  
thomas.fluri@ise.fraunhofer.de

#### ISFH

Carsten Lampe  
Tel.: 05151/999-522  
c.lampe@isfh.de

Daniel Eggert  
Tel.: 05151/999-522  
d.eggert@isfh.de

#### KIT

Prof. Dr. Thomas Wetzel  
Tel.: 0721/608-23462  
thomas.wetzel@kit.edu

Dr. Wolfgang Hering  
Tel.: 0721/608-22556  
wolfgang.hering@kit.edu

#### UFZ

Dr. Thomas Nagel  
(Simulationsmethoden)  
Tel.: 0341/235-1061  
thomas.nagel@ufz.de

#### ZAE Bayern

Dr. Stefan Hiebler  
(Latentwärmespeicher)  
Tel.: 089/329442-35  
stefan.hiebler@zae-bayern.de

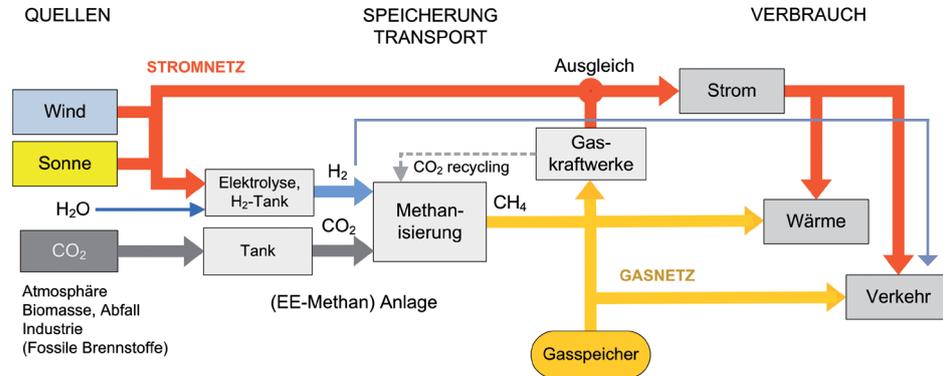
Eberhard Lävemann  
(Thermochemische Speicher)  
Tel.: 089/329442-18  
eberhard.laevemann@zae-bayern.de

Stephan Weismann  
Tel.: 0931/70564-338  
stephan.weismann@zae-bayern.de

## Chemische Energieträger

### Power-to-Gas

Das Konzept ermöglicht die Speicherung und Nutzung großer Mengen Strom aus erneuerbaren Energien. Die stoffliche Speicherung und Verteilung über das Erdgasnetz erlaubt eine bedarfsgerechte Nutzung zur Strom- und Wärmeerzeugung, in der Mobilität sowie in der chemischen Industrie. Grafik © Fraunhofer IEE und ZSW



### Kontakte

#### DBFZ

Dr.-Ing. Jan Liebetrau  
Tel.: 0341/2434-716  
jan.liebetrau@dbfz.de

#### DLR

Dr. Marina Braun-Unkhoff  
Tel.: 0711/6862-508  
marina.braun-unkhoff@dlr.de

Prof. Dr. Christian Sattler  
Tel.: 02203/601-2868  
christian.sattler@dlr.de

Dr. Antje Seitz  
Tel.: 0711/6862-484  
antje.seitz@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Dr. Ramona Schröer  
(Technologieentwicklung,  
Systemintegration)  
Tel.: 0561/7294-1744  
ramona.schroerer@  
iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Dr.-Ing. Achim Schaadt  
(Thermochemische Prozesse)  
Tel.: 0761/4588-5428  
achim.schaadt@ise.fraunhofer.de

Dr. Tom Smolinka  
(Wasserstoffherzeugung durch  
Elektrolyse, Entwicklung von  
PEM-Elektrolysesystemen)  
Tel.: 0761/4588-5212  
tom.smolinka@ise.fraunhofer.de

#### HZB

Prof. Dr. Roel van de Krol  
(Solare Brennstoffe)  
Tel.: 030/8062-43035  
roel.vandekrol@  
helmholtz-berlin.de

#### IZES

Dr. Bodo Groß  
(Technische Innovationen)  
Tel.: 0681/844 972-51  
gross@izes.de

Energie kann „stofflich“ gespeichert werden, indem Ökostrom mittels Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt wird. Bei Bedarf können unter Zugabe von Kohlendioxid Methan oder längererkettige Kohlenwasserstoffe erzeugt werden. Zur Speicherung können Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz eingespeist werden. Für flüssige Kohlenwasserstoffe stehen große Tanklager zur Verfügung. Mit dem Power-to-Gas- bzw. Power-to-Liquids-Konzept können so riesige Energiemengen über beliebige Zeiträume in einer vorhandenen Infrastruktur gespeichert werden. Dieser Lösungsansatz bietet auch die Möglichkeit, das Stromnetz mit anderen Märkten intelligent und bidirektional zu verknüpfen.

Chemische Energieträger bieten eine Reihe von Vorteilen:

- + Sie erlauben eine saisonale und abgesehen von Umwandlungsverlusten nahezu verlustfreie Speicherung von Energie.
- + Bei ihrer Herstellung wird überschüssiger Wind- und Sonnenstrom sinnvoll genutzt und speicherbar gemacht.

- + Sie können nachhaltige, CO<sub>2</sub>-neutrale Mobilität ermöglichen.
- + Sie verringern den Bedarf für den Ausbau des Stromnetzes.
- + Sie leisten einen Beitrag zur Netzstabilität und Bereitstellung von Regenergie.
- + Ihre Speicherform ist unaufwändig, da das ohnehin vorhandene Erdgasnetz bzw. vorhandene Tanklager mit sehr großen Speicherkapazitäten genutzt werden können (210 TWh für Methan, 250 TWh für flüssige Kohlenwasserstoffe).
- + Die bestehenden Gastransport- und -verteilnetze sind mit einer Gesamtlänge von 510.000 km gut geeignet, sämtliche Energiesektoren bedarfsgerecht und flächendeckend zu versorgen.
- + Durch die bestehende Anbindung an das trans-europäische Transportsystem können große Energiemengen mit dem europäischen Ausland ausgetauscht werden.

### F&E für chemische Speicher allgemein

- experimentelle und theoretische Untersuchung der Dynamik chemischer Speichersysteme
- Verbesserung der Wirkungsgrade bei der Umwandlung
- Wirtschaftlichkeitsanalysen
- Kopplung mit bestehenden EE-Anlagen

## Erneuerbarer Wasserstoff

- + Durch Wasserelektrolyse kann z. B. aktuell nicht nutzbarer Wind- und Sonnenstrom chemisch als Wasserstoff gespeichert werden. Dieser kann dann zur netzunterstützenden Rückverstromung und/oder als Kraftstoff eingesetzt werden.
- + Großmaßstäblich wird die elektrische Pufferung z. B. von Strom aus Off-Shore-Windkraftparks über die Elektrolyse und Wasserstoffspeicherung in Kavernen mit einer Verstromung in Gasturbinen ermöglicht.
- + Wasserstoff kann großmaßstäblich auch in konzentrierenden Solaranlagen über thermochemische Prozesse effizient hergestellt werden.

### F&E-Bedarf für Wasserstoff

- Senkung der Investitions- und Betriebskosten
- Bereitstellung großtechnischer Lösungen zur Wasserelektrolyse, thermochemischen Wasserstoffproduktion und geologischen Speicherung (Salzkavernen) sowie für Transport und Verteilung (Pipeline)
- Verbesserung der Betankungstechnologien und Aufbau eines flächendeckenden Tankstellennetzes
- Hinführung von Brennstoffzellenantrieben zu einem serienreifen Produkt für diverse mobile Anwendungen auf Straße, Schiene, zu Wasser und in der Luft

## Methan und höhere Kohlenwasserstoffe

Methan ist als Hauptbestandteil von Erdgas einer der wichtigsten Energieträger für die Strom- und Wärmebereitstellung und Rohstoff für zahlreiche chemische Produkte.

- + Wasserstoff ( $H_2$ ) kann mit Kohlendioxid ( $CO_2$ ) in synthetisches Methan ( $CH_4$ ) umgewandelt werden, das dann fast unbegrenzt ins Erdgasnetz eingespeist werden kann.
- + Außerdem kann Wasserstoff auch in Methanol ( $CH_3OH$ ) oder andere flüssige Energieträger umgewandelt werden, die sehr leicht handhabbar sind und dann für Mobilität, den Chemiesektor und für KWK-Anwendungen zur Verfügung stehen.
- + Methan hat eine höhere Energiedichte als Wasserstoff.

### F&E-Bedarf für Methan und höhere Kohlenwasserstoffe

- Systemsimulation zur Bestimmung der wirtschaftlichen Größen von Methanisierungsanlagen und anderer chemischer Speichersysteme
- Optimierung der Prozesssteuerung für Methanisierung
- Integration in bestehende Infrastrukturen
- Untersuchungen zur Optimierung und zum dynamischen Betrieb von Katalysatoren, Reaktoren und Prozessketten zur Umwandlung von Wasserstoff in Methan und höhere Kohlenwasserstoffe

- + Erneuerbarer Wasserstoff kann fossilen Wasserstoff in heutigen Raffinerien und anderen Industrien ersetzen.
- + Erneuerbarer Wasserstoff kann direkt zum Antrieb von Brennstoffzellenfahrzeugen genutzt werden und verursacht keine  $CO_2$ - oder verbrennungsbedingten Partikelemissionen.
- + Die derzeitige Brennstoffzellen-Fahrzeuggeneration hat eine ähnliche Reichweite wie Benziner.
- + Die Wasserelektrolyse benötigt keine aufwändige Verfahrenstechnik und produziert keinerlei unerwünschte Nebenprodukte.
- + Erneuerbarer Wasserstoff kann zu einem gewissen Teil (2-5 Vol.%) direkt ins Gasnetz eingespeist werden.

- Ertüchtigung von Gasturbinen für den Betrieb mit Wasserstoff
- Prozesse für die Erzeugung diverser Folgeprodukte für die Versorgung mit flüssigen Kraftstoffen und Chemikalien (Power-to-X)
- Reversible Elektrolyse-/Brennstoffzellen-Technologien zur Senkung des Investitionsbedarfs
- Speicherung von Wasserstoff über reversible Prozesse mit flüssigen organischer Hydriden (LOHC)
- Kopplung biologischer, chemischer und elektrochemischer Verfahren für die Erzeugung von höherwertigen Kohlenwasserstoffen

- + Erneuerbares Methan kann als Antrieb von Erdgasautos mit bestehender Technologie genutzt werden. Das Erdgas-Tankstellennetz (ca. 900) ist gut ausgebaut. Erdgasfahrzeuge haben eine vergleichbare Reichweite wie Benziner und Diesel. Methan verursacht nahezu keine verbrennungsbedingten Partikelemissionen.
- + Regeneratives Methan und regenerative flüssige Kohlenwasserstoffe können in einem postfossilen Zeitalter wichtige Mobilitätssektoren sicherstellen (Flug- und Schwerlastverkehr).
- + Durch biologische oder katalytische Methanisierung von Wasserstoff kann die strombasierte Erzeugung von Methan und höheren Kohlenwasserstoffen an bestehende Biomethananlagen gekoppelt und zum in situ Upgrading von Biogas genutzt werden.

### Jülich

Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten  
(Elektrochemische  
Verfahrenstechnik)  
Tel.: 02461/61-3076  
d.stolten@fz-juelich.de

### KIT

Prof. Dr.-Ing. Roland Dittmeyer  
(Strombasierte chemische Energie-  
träger, PtL)  
Tel.: 0721/608-23114  
roland.dittmeyer@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Thomas Kolb  
(Gastechnologie, PtG,  
biogene Energiespeicher, BtX)  
Tel.: 0721/608-24382  
thomas.kolb@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Peter Pfeifer  
(Dezentrale Synthese chemischer  
Energieträger, LOHC)  
Tel.: 0721/608-24767  
peter.pfeifer@kit.edu

### UFZ

PD Dr. Falk Harnisch  
(Elektrobiotechnologie)  
Tel.: 0341/235-1337  
falk.harnisch@ufz.de

Dr. Sabine Kleinstüber  
(Biologische Methanisierung)  
Tel.: 0341/235-1325  
sabine.kleinstueber@ufz.de

### Wuppertal Institut

Frank Merten  
(Systemanalyse)  
Tel.: 0202/2492-126  
frank.merten@wupperinst.org

### ZAE Bayern

Dr. Matthias Rzepka  
Tel.: 089/329442-31  
matthias.rzepka@zae-bayern.de

Maximilian Möckl  
Tel.: 089/329442-77  
maximilian.moeckl@zae-bayern.de

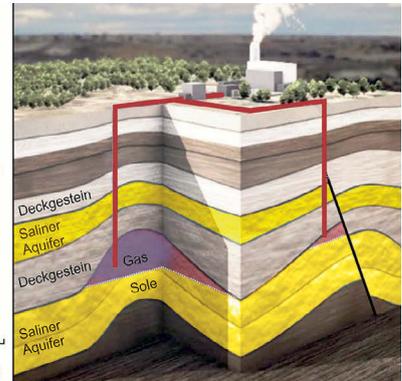
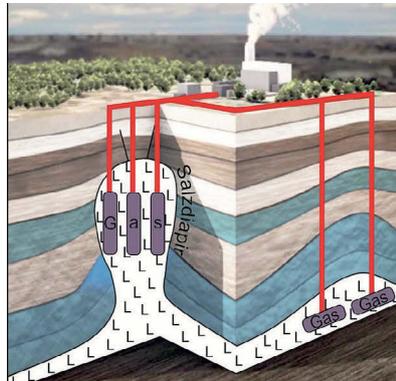
### ZSW

Dr. Michael Specht  
Tel.: 0711/7870-218  
michael.specht@zsw-bw.de

Dr. Ludwig Jörissen  
Tel.: 0731/9530-605  
ludwig.joerissen@zsw-bw.de

## Speicherung im geologischen Untergrund

**Optionen zur  
Untergrundspeicherung**  
Speichergesteine sind charakterisiert durch ihre Hohlräume:  
Links: **Kavernenspeicher** haben große ausgedehnte Hohlräume (10er bis 100er Meterskala.)  
Rechts: **Porenspeicher** besitzen große Volumina fein verteilter Poren (Mikro- bis Zentimeterskala).  
Mitte: Karte zeigt Salzstrukturen für potenzielle Kavernen (blau) sowie Sedimentbecken mit salinaren Aquiferen (gelb)  
© GFZ



### Kontakte

#### DLR

Prof. Dr. André Thess  
Tel.: 0711/6862-358  
andre.thess@dlr.de

#### GFZ

Prof. Dr. Ernst Huenges  
Tel.: 0331/288-1440  
huenges@gfz-potsdam.de

Dr. Cornelia Schmidt-Hattenberger  
Tel.: 0331/288-1552  
cornelia.schmidt-hattenberger@gfz-potsdam.de

Daniel Acksel  
Tel.: 0331/288-1078  
acksel@gfz-potsdam.de

#### ISFH

Prof. Dr. Oliver Kastner  
Tel.: 05151/999-525  
oliver.kastner@isfh.de

#### KIT

Prof. Dr. Thomas Kohl  
Tel.: 0721/608-45220  
thomas.kohl@kit.edu

Dr. Bernhard Schäfer  
Tel.: 0721/608-42944  
bernhard.schaefer@kit.edu

#### UFZ

Prof. Dr. Olaf Kolditz  
Tel.: 0341/235-1281  
olaf.kolditz@ufz.de

#### ZAE

Jens Kuckelkorn  
Tel.: 089/329442-17  
jens.kuckelkorn@zae-bayern.de

Der Untergrund bietet eine Schlüsselrolle zur Speicherung von Energie in der TWh-Skala. Dabei gibt es folgenden Optionen:

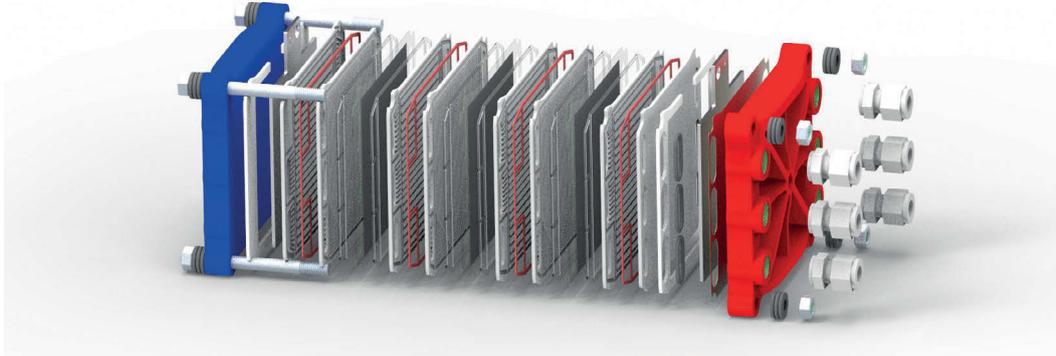
- **Lagerung von energierelevanten Stoffen im Untergrund** (z. B. Methan, H<sub>2</sub>): Die Lagerung von Methan in geologischen Formationen bietet bereits die Möglichkeit der stofflichen Speicherung von Energie, kann aber basierend auf temporären Überschüssen aus Wind- und Solarkraft noch erweitert werden. Die bekannte „Power-to-Gas-to-Power“-Technologie (PGP), die Erzeugung von Wasserstoff aus regenerativen Energien und daraus produziertem Methan, lässt sich durch gekoppelte Untergrundspeicher erweitern. Wesentlicher Punkt ist hier die CO<sub>2</sub>-Kreislaufnutzung.

- **Thermische Energiespeicherung:** In der warmen Jahreszeit im Untergrund eingespeicherte Überschusswärme kann später in der Heizperiode bei hoher Wärmenachfrage genutzt werden.
- **Adiabatische Druckluftspeicherung:** Bei der adiabatischen Druckluftspeicherung wird die Verpressung mit Kompressoren unterstützt. Das System hat einen Wärmespeicher für die Kompressionswärme, die bei Entspannung der Druckluft aus der Kaverne wieder genutzt wird. Die erwärmte Druckluft wird mit Hilfe der Turbinen zur Stromerzeugung eingesetzt.

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Bereitstellung großtechnischer Lösungen der Untergrundspeicherung für ortsbezogenen Speicherbedarf (z. B. an Power to Gas Standorten)
- Machbarkeit der Untergrundspeicherung von Gasen, die in der Umgebung der Speichergesteine reagieren (z. B. Wasserstoff in Porenspeicher)
- Prozessanalyse und Monitoring der thermodynamischen, physiko-chemischen und mikrobiologischen Vorgänge bei der Speicherung
- Auf Basis der Analyse müssen die drei Komponenten des Gesamtsystems zusammen entwickelt werden:
  1. verfahrenstechnischer (oberirdischer) Teil
  2. Bohrloch (Injektion und Abdichtung)
  3. geologisches Reservoir inklusive seiner Deckgesteine
- Untergrundspeicherung muss unter Berücksichtigung von Umweltverträglichkeitskriterien in das Energiesystem eingepasst werden. Energiespeicher nehmen eine Schlüsselstellung im Rahmen der Energiewende ein.

## Brennstoffzellen



PEMFC-Brennstoffzellen  
aus dem ZSW  
© ZSW

Brennstoffzellen wandeln einen Brennstoff zusammen mit (Luft-)Sauerstoff in Strom und Wärme um. Sie können je nach Brennstoffzellentyp entweder mit Wasserstoff oder mit kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoffen wie Methanol, Erdgas, Benzin oder Diesel betrieben werden.

Brennstoffzellen können die Effizienz des Energiesystems deutlich steigern und zu den Emissionsreduktionszielen beitragen. Sie bieten emissionsfreie, individuelle und öffentliche Mobilität mit ähnlichen Möglichkeiten wie konventionelle Antriebe.

- + Brennstoffzellen erreichen bei besonders niedrigen Schadstoffemissionen besonders hohe elektrische Wirkungsgrade und einen hohen Gesamtnutzungsgrad bei gleichzeitiger Wärmenutzung.
- + Sie sind sowohl für die dezentrale Strom-Wärme-Versorgung als auch für den Antrieb von Elektrofahrzeugen geeignet. Hier sind erhebliche Brennstoffeinsparungen und Leistungserhöhungen möglich.
- + Schon der Brennstoffzellenbetrieb auf Basis fossiler Energiequellen bringt eine erhebliche CO<sub>2</sub>-Einsparung und damit eine Entlastung des Klimasystems. In Verbindung mit erneuerbaren Brennstoffen ist eine CO<sub>2</sub>-neutrale Stromerzeugung möglich.

### Potenziale

- Bis 2050 wird die Mobilität mit Brennstoffzellen einen signifikanten Anteil erreicht haben und spürbar zur Reduktion der Verkehrsemissionen beitragen.
- Bereits jetzt halten Brennstoffzellen Einzug in die Hausenergieversorgung. Durch ihren hohen Gesamtwirkungsgrad dank Kraft-Wärme-Kopplung werden sie vor allem im Gebäudebestand dazu beitragen, die Emissionen zu senken. Allein in Japan wurden mehr als 120.000 Hausenergiesysteme verkauft, womit dort die Schwelle zur Kommerzialisierung schon geschafft wurde.
- Die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC) hat für kleine Stromversorgungen bereits die Schwelle zur Kommerzialisierung überschritten. Weit mehr als 33.000 Systeme haben als netzunabhängige Stromversorgung z. B. für Wohnmobile und Yachten den Einzug in den Alltag gefunden.
- Aus den Feldversuchen resultieren viele Erkenntnisse über den Alltagsbetrieb, die in die Entwicklung der Produkte der nächsten Generation einfließen. Hinzu kommt die Entwicklung kostengünstiger Lösungen, sowohl bei den Kernkomponenten (Membran, Katalysatoren, Bipolarplatten) als auch bei den peripheren Komponenten (Pumpen, Ventile, Sensoren).

### Kontakte

#### DLR

Prof. Dr. K. Andreas Friedrich  
Tel.: 0711/6862-278  
andreas.friedrich@dlr.de

#### Fraunhofer ISE

Dr. Christopher Hebling  
(Wasserstofftechnologien,  
Wasserstoffinfrastruktur)  
Tel.: 0761/4588-5195  
christopher.hebling@ise.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Ulf Groos  
(Brennstoffzellensysteme)  
Tel.: 0761/4588-5202  
ulf.groos@ise.fraunhofer.de

#### IZES

Dr. Bodo Groß  
Tel.: 0681/844 972-51  
gross@izes.de

#### Jülich

Prof. Dr. Detlef Stolten  
Tel.: 02461/61-3076  
d.stolten@fz-juelich.de

#### KIT

Prof. Dr. Ellen Ivers-Tiffée  
(elektrochem. Charakterisierung  
u. Modellierung)  
Tel.: 0721/608-47490  
ellen.ivers-tiffée@kit.edu

Dr. André Weber  
Tel.: 0721/608-47572  
andre.weber@kit.edu

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Brennstoffzellen

Zur Begleitung der Markteinführung von Brennstoffzellen und der Entwicklung der nächsten Produktgeneration sind weitere, umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen erforderlich.

- kompakte Niedertemperatur-Brennstoffzellen (Polymer Elektrolyte Fuel Cells = PEFC)
- Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) und Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC) für unterschiedliche Brennstoffe

- Direkt-Kohlenstoff-Brennstoffzelle, die reines CO<sub>2</sub> als Verbrennungsprodukt liefert
- „reversible“ Brennstoffzellen/Elektrolyseur-Systeme
- biologische Brennstoffzellen, insbesondere mikrobielle Brennstoffzellen
- Kostenreduktion durch neue Werkstoffe, Katalysatoren und Membranen sowie durch neue serientauglicher Fertigungsprozesse

**Hochtemperatur-Polymer-  
elektrolyt-Brennstoffzelle,**  
die bei einer Betriebstemperatur  
von bis zu 180 °C Strom für  
die On-Bord-Nutzung in  
Flugzeugen, Lkw, Schiffen  
und Bahnen erzeugt.  
© Jülich



#### Wuppertal Institut

Dr. Peter Viebahn  
(Systemanalyse)  
Tel.: 0202/2492-306  
peter.viebahn@wupperinst.org

#### ZAE Bayern

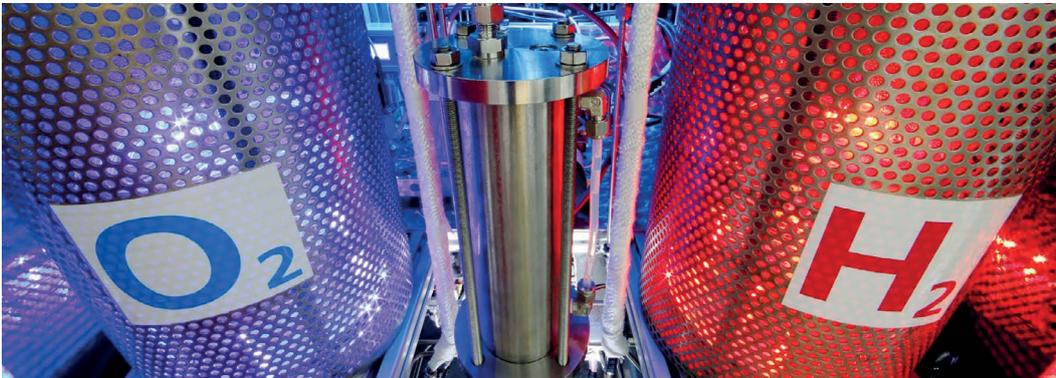
Dr. Matthias Rzepka  
Tel.: 089/329442-31  
matthias.rzepka@zae-bayern.de

#### ZSW

Dr. Ludwig Jörissen  
Tel.: 0731/9530-605  
ludwig.joerissen@zsw-bw.de

- leistungsfähigere und genauere, technisch-mathematische Modelle, die skalenergreifend sind und durch Beschreibung thermodynamischer, elektrochemischer sowie Massentransport-Phänomene (Stoff- und Wärmetransport, Stromübergänge sowie Zweiphasenströmungen) zur Designoptimierung auf Zell- und Stack-Ebene und zur Prädiktion von Leistungsfähigkeit und Dauerhaltbarkeit dienen
- Steigerung von Zuverlässigkeit, Leistungsfähigkeit und Wirkungsgrad der Systeme
- Verlängerung der Lebensdauer von Brennstoffzellen durch Aufklärung der Degradationsmechanismen und Alterungseffekte mittels verbesserter Zeitraffertests (AST: Accelerated Stress Tests) in Abhängigkeit neuer Materialien, Betriebsstrategien und Kontrollsysteme
- innovativen Diagnose- und Untersuchungsmethoden mit Reparaturstrategien für Brennstoffzellen
- neue, korrosionsbeständige Katalysatoren und Elektrodenstrukturen für die PEFC und reformat-
- verträgliche Katalysatoren und Elektrodenstrukturen für die HT-PEFC
- Fertigungstechnologien für PEFC-Komponenten und Stacks
- kostengünstige Reformierungstechniken (z. B. von Erdgas, Methanol, Diesel)
- Brennstoffzellen-Systemtechnik; insbesondere Stromrichtertechnik, Fernzustandsdiagnose und Fehlerprognose sowie optimierte Netzintegration
- Regelungsstrategien für Brennstoffzellen in Hybridsystemen
- Pilotanlagen mit Mittel- und Hochtemperatur-Brennstoffzellen (MCFC, SOFC) in Kraft-Wärme-Kopplung zur Erforschung des technischen Verhaltens dieser Systeme
- innovative Systeme wie z. B. Hybridkraftwerke mit Kopplung von Mikrogasturbine und Brennstoffzelle
- multifunktionale Brennstoffzellensysteme zur Brandbekämpfung und Wassergewinnung für die zivile Luftfahrt

## Erneuerbarer Wasserstoff



Elektrolyseur  
© DLR

In einer nachhaltigen Energiewirtschaft wird Wasserstoff eine wesentliche Rolle im Verkehr und auch bei der Speicherung regenerativer Energien spielen. Dafür ist die Entwicklung effizienter Verfahren zur großtechnischen Erzeugung von Wasserstoff Voraussetzung. Mittelfristig ist die Wasserstoffbereitstellung mit Hilfe von Strom aus erneuerbaren Energien die sinnvollste Variante. Langfristig können auch solar-thermochemische Prozesse, wie etwa die solar beheizte Reformierung von Erd- oder Biogas oder die Spaltung von Wasser in Kreisprozessen auf Grund ihrer hohen Effizienz interessante Alternativen sein.

Erneuerbarer Wasserstoff bietet eine Reihe von Vorteilen:

- + Er ist flexibel nutzbar im Verkehr, in chemischen Prozessen, zur Elektrizitätserzeugung und für Wärmerückgewinnung.
- + Die Verwendung von Wasserstoff ist „sauber“, da er rückstandsfrei zu Wasser verbrennt.
- + Er ermöglicht Unabhängigkeit von fossilen Rohstoffquellen.
- + Wasserstoff dient als Basis für die Erzeugung synthetischer Kraftstoffe.
- + Die hochdynamische Wasserstoffproduktion hat einen guten Wirkungsgrad.
- + Wasserstoff kann zentral großskalig gespeichert werden (z. B. in Salzkavernen) und ist dann mittels Pipelines verteilbar.
- + Wasserstoff kann auch dezentral (z. B. über Tankstellen) zur Verfügung gestellt werden.

Die folgenden potenziell CO<sub>2</sub>-freien Verfahren zur Wasserstoffproduktion befinden sich in unterschiedlichem Forschungs-, Entwicklungs- und Anwendungsstadium:

### • Alkalische Elektrolyse

AEL ist schon für die Erzeugung von Wasserstoff als chemischer Rohstoff industriell im Megawatt-Maßstab verfügbar (Betriebstemperatur ca. 80 °C).

### • Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse

PEM basiert auf einer protonenleitenden Polymerelektrolytmembran als Elektrolyt. Sie ist im MW-Maßstab bereits für Demonstrationszwecke verfügbar (Betriebstemperatur bei ca. 60–80 °C) und wird aktuell weiterentwickelt.

### • Hochtemperatur-Wasserdampfelektrolyse

SOEC basiert auf einem Sauerstoffionenleiter als Elektrolyt. Die Technologie befindet sich noch im Forschungsstadium und kann erst im unteren Kilowattbereich als Versuchsanlage betrieben werden (Betriebstemperatur ca. 800–1000 °C).

### • Solar thermochemische Kreisprozesse

Wasser kann auch thermochemisch über sogenannte Kreisprozesse gespalten werden. Die notwendige Wärme von 800 bis 1500 °C wird über konzentrierende Solarsysteme erzeugt. Die Technologien befinden sich in einem technischen Erprobungsmaßstab von bis zu 750 kW thermisch.

### • Photo-elektrochemische Wasserspaltung

Die direkte photoelektrochemische (PEC) Umwandlung von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff mit modifizierten Halbleitermaterialien ermöglicht die Integration von Lichtabsorption und Elektrokatalyse in einem Bauelement. Die besten Wirkungsgrade variieren zurzeit zwischen 5–15 % für kostengünstige Metalloxide bzw. komplex aufgebaute III-V-Halbleiterelektroden. Derzeitige F&E-Arbeiten streben ein Verständnis der grundlegenden Mechanismen bei der lichtinduzierten Wasserspaltung an und entwickeln neue, im Kontakt mit einem wässrigen Elektrolyten chemisch stabile Halbleiterschichten und Katalysatoren, sowie Konzepte für skalierbare Systemlösungen.

### • (Photo)-bioelektrochemische Wasserspaltung

Alternativ zur abiotischen elektrochemischen Wasserspaltung gibt es die Möglichkeit einer biologisch basierten (photo)-bioelektrochemischen Wasserstoffproduktion. Hierbei dienen wasserstoffproduzierende Enzyme

### Kontakte

#### DLR

Dr. Alexander Dyck  
Tel.: 0441/99906-310  
alexander.dyck@dlr.de

Prof. Dr. K. Andreas Friedrich  
Tel.: 0711/6862-278  
andreas.friedrich@dlr.de

Prof. Dr. Christian Sattler  
Tel.: 02203/601-2868  
christian.sattler@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Jochen Bard  
Tel.: 0561/7294-346  
jochen.bard@iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Dr. Tom Smolinka  
(Wasserstoffherzeugung durch  
Elektrolyse, Entwicklung von  
PEM-Elektrolysesystemen)  
Tel.: 0761/4588-5212  
tom.smolinka@ise.fraunhofer.de

#### HZB

Prof. Dr. Roel van de Krol  
(Solare Brennstoffe)  
Tel.: 030/8062-43035  
roel.vandekrol@  
helmholtz-berlin.de

Prof. Dr. Sebastian Fiechter  
Tel.: 030/8062-42927  
fiechter@helmholtz-berlin.de

#### Jülich

Prof. Dr. Detlef Stolten  
(Elektrochemische  
Verfahrenstechnik)  
Tel.: 02461/61-3076  
d.stolten@fz-juelich.de

Prof. Dr. Rüdiger-A. Eichel  
(Grundlagen Elektrochemie)  
Tel.: 02461/61-4644  
r.eichel@fz-juelich.de

#### KIT

Dr. Thomas Jordan  
(Wasserstoffsicherheit)  
Tel.: 0721/608-26105  
thomas.jordan@kit.edu

**Wuppertal Institut**

Frank Merten  
(Systemanalyse)  
Tel.: 0202/2492-126  
frank.merten@wupperinst.org

**UFZ**

Prof. Dr. Bruno Bühler  
Tel.: 0341/235-4687  
bruno.buehler@ufz.de

Prof. Dr. Andreas Schmid  
Tel.: 0341/235-1246  
andreas.schmid@ufz.de

Dr. Jörg Toepel  
Tel.: 0341/235-48 22 82  
joerg.toepel@ufz.de

**ZAE Bayern**

Dr. Matthias Rzepka  
Tel.: 089/329442-31  
matthias.rzepka@zae-bayern.de

Maximilian Möckl  
Tel.: 089/329442-77  
maximilian.moeckl@zae-bayern.de

**ZSW**

Dr. Michael Specht  
Tel.: 0711/7870-218  
michael.specht@zsw-bw.de

Prof. Dr. Werner Tillmetz  
Tel.: 0731/9530-607  
werner.tillmetz@zsw-bw.de

und Mikroorganismen als Bioelektrokatalysatoren. Von besonderem Interesse sind dabei mikrobielle Elektrolyseure, welche rein durch elektrischen Strom angetrieben werden, sowie auf Photoelektroden basierende Elektrolyseure. Während erste auf elektroaktiven Mikroorganismen basieren, basieren letztere auf biologischen Komponenten, welche die Photosynthese von Pflanzen bzw. von Algen nachahmen.

- **Bio-artifizielle Photosynthese**

Diese Art der Wasserstoffproduktion wird durch Sonnenenergie angetrieben. Hierbei werden wasserstoffproduzierende Enzyme an die natürliche Photosynthese von Mikroalgen gekoppelt. Diese Technologie befindet sich in einem frühen Forschungs- und Entwicklungsstadium. Ziel ist unter anderem auch die Entwicklung von wasserspaltenden/wasserstoffproduzierenden Katalysatoren zu ermöglichen, deren Komponenten die Photosynthese von Pflanzen bzw. von Algen nachahmen. Der Schwerpunkt liegt jedoch auf der Entwicklung zellbasierter Systeme.

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf für erneuerbaren Wasserstoff

- Kostengünstige Materialien, Materialkombination und Ersatzstoffe für Katalysatoren, Membranen, Stromübertragungs- und Gasverteilungs-Schichten, Rahmen- und Dichtungsstrukturen für alkalische, PEM- und Hochtemperaturelektrolyseure
- Entwicklung kostengünstiger, langzeitstabiler Elektrodensysteme mit innovativen Elektrodenstrukturen und Elektrodenzusammensetzungen
- Entwicklung von sicheren, effizienten Hochdruck-Elektrolyseverfahren
- Entwicklung kostengünstiger, großserientauglicher Produktionstechnologien
- Entwicklung solarchemischer Verfahren zur Reformierung von Methan mit Hilfe konzentrierender Solarsysteme
- Realisierung der direkten Wasserspaltung mit Hilfe thermochemischer Kreisprozesse, um solaren Wasserstoff herzustellen
- Entwicklung von Betriebs- und Sicherheitsüberwachungssystemen für den vollautomatischen Wasserstofferzeugungsbetrieb; Verbesserung der Zuverlässigkeit der Anlagen
- Grundlagen der Erzeugung von Wasserstoff aus biogenen Ressourcen:
  - effiziente Kopplung von Hydrogenasen an die Photosysteme
  - Etablierung von geeigneten mikrobiellen Wirtssystemen
  - Kontinuierliche biologische Produktionssysteme

### Schnittstellentechnologien zu einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft

- Optimierung der systemtechnischen Einbindung und Betriebsführung; Reduktion der Systemkomplexität
- Reduktion des Eigenenergiebedarfs
- Verbesserte Nutzung von Stoff- und Energieströmen; Kopplung mit regenerativen Energien
- System- und regelungstechnische Einbindung in Energiespeichersysteme (Netz – Elektrolysesystem – Speicher – ggf. Rückverstromung – Nutzen von Abwärmern)
- Optimierung der Betriebsführung zur schnellen Bereitstellung von Regelenergie und zum Umgang mit fluktuierendem (Überschuss-)Stromangebot (z. B. dynamisches Abfahren realer Wind- und PV-Profile, intermittierender Betrieb, Umsetzen rascher Leistungssprünge)

### Photosynthese zur Wasserspaltung

- Entwicklung von edelmetallfreien Katalysatoren, die ungiftig, kostengünstig und leicht verfügbar sind
- Erforschung der kinetischen Prozesse bei der Wasserspaltung in künstlichen und natürlichen Systemen
- Entwicklung stabiler Photoabsorber und Photokatalysatoren auf molekularer und anorganischer Basis.

## Kühlung



Solaranlage der IHK Freiburg  
© Fraunhofer ISE

Rund 16% des Stroms werden in Deutschland für Kälteprozesse angewendet. Dies erfolgt vor allem in Stunden ohnehin hoher Netzbelastung, gleichzeitig werden große Mengen an Solarwärme im Sommer als Überschuss nicht genutzt. Mithilfe solarthermischer Kälteerzeugung kann man diese Überschusswärme sinnvoll in Kälte wandeln und die Netze entlasten. Ein noch wesentlich größeres Potenzial hat solare Kühlung in sonnenreichen Zonen, in denen zugleich Kühlung und Klimatisierung einen hohen Anteil des Energieverbrauchs bedingen.

Wärme kann mit Sorptionstechniken zum Antrieb thermodynamischer Kreisprozesse genutzt werden, die Heizwärme oder aber Kälte bereitstellen (Absorptionswärmepumpen, Absorptionskältemaschinen).

Man unterscheidet dabei

- adsorptive Systeme (mit Feststoffen als Sorbens)
- absorptive Systeme (mit Flüssigkeiten als Sorbens)
- + Sorptionstechnologien sind klimafreundlich, da sie ohne Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW) arbeiten.
- + Diese Kühlsysteme können in einem zweiten Betriebsmodus in den meisten Fällen auch als Heizung eingesetzt werden.

- + Sorptive Systeme bieten auch Möglichkeiten, thermische Energie effektiv und vielseitig einsetzbar zu speichern.
- + Typische Temperaturen für den Antrieb einstufiger Systeme liegen bei 60 °C bis 120 °C. Sie eignen sich damit ideal für den Betrieb mit solarer oder geothermischer Wärme, Fernwärme, Abwärme aus Blockheizkraftwerken oder Brennstoffzellen.
- + Mittlerweile ist die Kombination von Solaranlagen auch mit zwei- und dreistufigen Kälteverfahren in ersten Projekten realisiert. Diese Technik ist vor allem in sonnenreichen Zonen einsetzbar.

### Potenziale

Die technische Umsetzbarkeit solarbetriebener Kühlsysteme wurde in den letzten Jahren erfolgreich in vielen Projekten bestätigt. Bereits heute gibt es Marktsegmente, in denen diese Systeme ökonomisch sinnvoll eingesetzt werden können. Aus Untersuchungen ergeben sich eine große Anzahl von Verbesserungsansätzen, mit deren Umsetzung die Erschließung weiterer Einsatzmärkte möglich wäre.

### Kontakte

#### DLR

Dr. Alexander Dyck  
Tel.: 0441/99906-310  
alexander.dyck@dlr.de

Klaus Hennecke  
Tel.: 02203/601-3213  
klaus.hennecke@dlr.de

Prof. Dr. Bernhard Hoffschmidt  
Tel.: 02203/601-3200  
bernhard.hoffschmidt@dlr.de

Prof. Dr. Robert Pitz-Paal  
Tel.: 02203/601-2744  
robert.pitz-paal@dlr.de

#### Fraunhofer ISE

Dr.-Ing. Constanze Bongs  
(Gebäudesystemtechnik)  
Tel.: 0761/4588-5487  
constanze.bongs@ise.fraunhofer.de

#### ZAE Bayern

Manuel Riepl  
Tel.: 089/329442-43  
manuel.riepl@zae-bayern.de

Stephan Weismann  
Tel.: 0931/70564-338  
stephan.weismann@zae-bayern.de

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Kühlung

- Materialforschung für Sorbentien
- Weiterentwicklung thermisch angetriebener Kälteanlagen kleiner Leistung (kompakte, effiziente Wärmetauscher, interne Wärmerückgewinnung)
- Entwicklung von elektrisch/thermischen Hybrid-Systemen
- Weiterentwicklung kleiner und mittlerer Absorptionskälteanlagen für die Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zur lokalen Klimakälteversorgung, um über eine Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung eine ganzjährige Nutzung der Abwärme aus Blockheiz-Kraftwerken zu erreichen
- Erforschung von Phase Change Material-Speichern (PCM) im Bereich 5–15 °C zur Leistungspufferung in Klimakälteanlagen
- systemtechnische Forschung im Bereich Anlagenkonzepte, Auslegung, Regelung, Wartung, Betriebsführung

## Wärmepumpen

Wärmepumpen-Teststand  
© ISFH



### Kontakte

#### DLR

Dr. Alexander Dyck  
Tel.: 0441/99906-310  
alexander.dyck@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Dr. Dietrich Schmidt  
(Gesamtsystembetrachtungen  
Gebäude und Quartiere)  
Tel.: 0561/804-1871  
dietrich.schmidt@iee.fraunhofer.de

Dr. Michael Krause  
(Systemintegration und  
Betriebsstrategien)  
Tel.: 0561/804-1875  
michael.krause@iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Dr.-Ing. Marek Miara  
(Wärmepumpen)  
Tel.: 0761/4588-5529  
marek.miara@ise.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Ivan Malenković  
(TestLab Heat Pumps and Chillers)  
Tel.: 0761/4588-5533  
ivan.malenkovic@ise.fraunhofer.de

#### ISFH

Fabian Hüsing  
(Thermische Energiesysteme)  
Tel.: 05151/999-645  
huesing@isfh.de

#### ZAE

Andreas Krönauer  
Tel.: 089/329442-13  
andreas.kroenauer@zae-bayern.de

In einer Wärmepumpe (WP) wird in einem thermodynamischen Kreisprozess mit einem geeigneten Kältemittel Wärmeenergie bei niedrigen Temperaturen (z. B. aus dem Erdreich, der Luft oder aus dem Grundwasser) aufgenommen. Zur Steigerung der Temperatur wird der Dampf des Kältemittels verdichtet, so dass die Wärmeenergie anschließend auf hohem Temperaturniveau (z. B. für Raumheizung) abgegeben werden kann. Die Besonderheit der Wärmepumpentechnologie besteht darin, dass zur Bereitstellung von Wärme (und Kälte) auch Umweltenergie genutzt wird. Dies kann sowohl Energie aus dem Erdreich, dem Grundwasser sowie der Luft sein als auch aus Abwärme oder Abwasser. Der restliche Energiebedarf wird meistens als elektrische Energie zugeführt. Je mehr Umweltenergie und weniger Elektroenergie eine WP benötigt, desto effizienter arbeitet sie. Dies bringt sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Vorteile mit sich.

In einem zunehmend regenerativen, elektrischen Energiesystem gewinnen WP an Bedeutung, da sie die effizienteste Technologie zur Wandlung elektrischer Energie in Wärme sind.

WP können außerdem als Koppler zwischen den Sektoren Strom und Wärme eine wichtige Rolle einnehmen: Der zunehmend fluktuierenden Einspeisung durch Windkraft und Photovoltaik muss auch mit einer Flexibilisierung der Nachfrageseite begegnet werden. Aufgrund der vorhandenen Speicherkapazitäten können WP-Anlagen hierzu beitragen. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, den zunehmend regenerativ erzeugten

Strom effizient für Wärmeanwendungen in Gebäuden zu nutzen.

Im Jahr 2014 lag der Marktanteil der WP im Segment Neubau bei 32%. Mehrere Studien prognostizieren eine dominante Rolle der WP für die Bereitstellung von Wärme (und Kälte) sowohl in Wohn- als auch in Nichtwohngebäuden im Wärmerzeugermarkt der Zukunft. Das wirtschaftliche Potenzial ist stark von den Strompreisen abhängig. Für die Zukunft sind Preismodelle notwendig, die die WP-Technologie nicht benachteiligen. Problematisch ist, dass zunehmend außenluftgekoppelte WP mit geringer Effizienz und Nachteilen in der Netzdienlichkeit installiert werden, wohingegen der Absatz hocheffizienter erdreichgekoppelter WP stark rückläufig ist (30% im Jahr 2015). Hier sollten geeignete Konzepte erarbeitet werden, um diesem Trend entgegenzuwirken.

- + WP sind gut einsetzbar in regenerativen Energienetzen für Siedlungen und Quartiere.
- + Außerdem sind sie kombinierbar mit Photovoltaik, Solarthermie und Niedertemperatur-Abwärmequellen.
- + Gegenüber fossil betriebenen Heizgeräten hat die WP-Technologie (bei einem hinreichenden Anteil regenerativ erzeugten Stroms) sowohl primär-energetische als auch ökologische Vorteile.
- + In Kombination mit Batteriespeichern bieten WP die Möglichkeit selbst erzeugten PV-Strom zu verbrauchen.
- + WP können ausgleichende Regelenergie bei einem zentral geregelten Demand Side Management (DSM) bereitstellen.

## Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Wärmepumpen (WP)

### Integration der WP in das Energiesystem

- Ein zukünftiges Problem für das gesamte Energiesystem kann die sog. Thermosensibilität werden (wenn immer mehr Strom zur Wärmebereitstellung genutzt wird, steigt der Strombedarf bei sinkenden Temperaturen). Diesbezüglich besteht weiterer Forschungsbedarf, um für die Transformation des Stromsystems ein passendes „Überschussmanagement“ zu entwickeln.
- Die gewünschte Flexibilisierung der WP-Laufzeit kann eine Verschlechterung der Effizienz der WP und/oder zusätzliche Investitionen zur Folge haben. Um damit verbundene Mehrkosten zu kompensieren, müssen entsprechende Geschäftsmodelle entwickelt werden.

### Entwicklung primärenergetisch optimierter Wärmeversorgungskonzepte für Quartiere auf Basis von WP:

- Entwicklung netzdienlicher Betriebsstrategien (zentral und dezentral) von WP eines Quartiers: Anpassung an das regionale Dargebot von Wind- und Solarstrom durch Lastverschiebung und Minimierung von Spitzenlasten mittels Speichertechnologien (Strom und Wärme) unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wärmequellen der WP
- Umsetzung von WP-Quartieren in Demonstrationsvorhaben und wissenschaftliche Begleitung/Optimierung, Entwicklung allgemeingültiger Planungshilfen für WP-Quartiere (Bestand und Neubau)
- Untersuchung von regenerativ versorgten Niedertemperaturwärmenetzen mit dezentralen (Klein-)WP

### Optimierung von WP:

- für einen hocheffizienten Winterbetrieb, d. h. einen hohen Temperaturhub bei niedrigen Quellentemperaturen
- für hohe Senkentemperaturen (für Prozesswärme, Wärmespeicherung bei Stromüberschuss im Netz (Power-to-Heat), zentrale Trinkwarmwasserbereitung, Wärmenetze)

- durch hohe Modulationsfähigkeit und die Fähigkeit zu schnellen und stabilen Lastwechseln um ein schwankendes (PV-)Stromangebot besser zu nutzen
- durch verlustarme Prozessführung im dynamischen Betrieb (geringe Zeitkonstanten, reduzierte Mindeststillstandzeiten, weiter Temperatur- und Durchflussbereich)
- durch selbstlernende bzw. selbstoptimierende Prozessführung (z. B. zur Selbstkorrektur von Fehleinstellungen durch den Nutzer und Installateur)
- für die Anwendung als dezentrale Trinkwarmwasserbereiter in Wohnungsstationen
- für die Integration in Versorgungssituationen mit stark veränderlichen Temperatur-Spreizungen auf der Quellenseite (z. B. saisonale Wärmespeicherung)
- für verringerte Schallemissionen speziell bei den Außenluft-WP

### Systemtechnische Forschung zur Integration von WP in das Gebäudewärmesystem:

- optimierte Pufferspeicherbeladung für Heizung und/oder Warmwasser
- Kopplung mit Sonnenwärme auf der Quellenseite zur Ermöglichung kleinerer Erdreichwärmequellen und zur Verhinderung von Langzeitauskühlung
- Kopplung mit Sonnenwärme auf der Senkenseite zur Steigerung der Systemeffizienz
- Kopplung mit lokal erzeugtem Sonnenstrom und Batteriespeichern
- Entwicklung ganzheitlicher Systemregelalgorithmen unter Einbindung der Vorhersage von Bedarfs- und Angebotsprofil für die Kopplung mit Sonnenstrom und -wärme
- Definition an notwendigen Schnittstellen und Schnittstellenparametern
- Monitoring von Wärmepumpen im System zur Validierung von Regelungsstrategien und zur Identifizierung von Optimierungsbedarf
- neue Anwendungen wie dezentrale kompakte Kleinst-WP für Wohnungsstationen oder Solar-WP-Module für Fassaden mit hybriden Strom-Wärme-kollektoren

## Wandlung von Wärme in Strom

*Organic Rankine Cycle  
Demonstrationsanlage  
in Lahendong (Indonesien)  
© GFZ Potsdam*



### Kontakte

#### GFZ

Stefan Kranz  
Tel.: 0331/288-1565  
stefan.kranz@gfz-potsdam.de

#### KIT

Dr. Wolfgang Hering  
Tel.: 0721/608-22556  
wolfgang.hering@kit.edu

Dr. Alexandru Onea  
Tel.: 0721/608-22949  
alexandru.onea@kit.edu

Dr. Dietmar Kuhn  
(Kraftwerkstechnik)  
Tel.: 0721/608-23483  
dietmar.kuhn@kit.edu

#### Wuppertal Institut

Dietmar Schüwer  
(Systemanalyse)  
Tel.: 0202/2492-288  
dietmar.schuewer@wupperinst.org

### A) Niedertemperatur

Niedertemperatur-Stromerzeugungsanlagen bestehen aus drei Teilsystemen:

- Thermalwasserkreislauf
- Verstromungsprozess im Kraftwerkskreislauf
- Kühlung

Die effiziente und verlässliche Realisierung einer Anlage entsprechend der gegebenen Randbedingungen der Quelle und der Senke erfordert die technische Charakteristik der einzelnen Teilsysteme sowie eine optimale Abstimmung der Teilsysteme aufeinander.

Für den Niedertemperatur-Kraftwerksprozess kommen meist Organic Rankine Cycle (ORC)-Anlagen zum Einsatz. Diese nutzen ein Arbeitsmittel mit niedrigem Siedepunkt in einem geschlossenen Dampfprozess. ORC-Anlagen kommen in Deutschland seit vielen Jahren vorrangig in der Nutzung von Motor- und Industrie-Abwärme (Temperatur der Wärmequelle 200 bis 500 °C) zum Einsatz und stellen in diesem Anwendungsbereich eine etablierte Technik dar. Forschungsbedarf besteht hingegen bei Temperaturen der Wärmequelle unter 200 °C. Diese Technologie bekommt in dem zukünftigen gekoppelten Strom-Wärme-Energiesystem eine besondere Bedeutung.

#### F&E-Bedarf für Niedertemperatur

- effizienter Teillastbetrieb von ORC-Anlagen
- optimierte Kopplung der drei Kreisläufe (Thermalwasser, Verstromung, Kühlung)
- Verlässlichkeit der Systemkomponenten mit Anpassung an verschiedene Standorte

ORC ermöglicht:

- + Nutzbarkeit von Energie aus niedrigexergetischen Quellen
- + kontinuierliche Nutzung von geothermischen Quellen mit Stromgewinnung in Zeiten von geringem Bedarf an Wärmebereitstellung
- + Nutzung von abgetrenntem Heißwasser aus Heißwasser-Dampflagerstätten
- + Verstromung in einem geschlossenen System

#### Potenziale

- Potenzial für die Stromgewinnung aus Abfallwärme oder aus geothermischen Quellen (nach IPCC-Report: weltweit ca. 70 GW bis 2050).
- ORC hat Marktpotenzial für die heimische Industrie.

### B) Hochtemperatur

Der elektrochemische Wandler AMTEC (Alkali Metal Thermal-to-Electric Converter) ist eine thermoelektrische Zelle die Wärme direkt in Gleichstrom umwandelt. Er kann Temperaturen im Bereich 600 °C–1000 °C verarbeiten und eignet sich somit für Hochtemperatur-Prozesse wie z. B. konzentrierende Solarenergie, Nutzung industrieller Abwärme und als Stromquelle für die Raumfahrt.

#### F&E-Bedarf für Hochtemperatur

- Materialuntersuchungen (Keramik, Keramik-Metall Verbindungen, Material der Elektroden)
- Vermeidung der thermischen und elektrischen Verluste und
- Limitierung der Degradation der Zelle
- Erhöhung des Wirkungsgrades auch bei Langzeitoperationen
- theoretische Charakterisierung und multi-physics/multi-scale Simulation der fluiddynamischen, elektrothermischen, und thermischen Prozesse

## (Mikro-)Gasturbinen (mobil + stationär)

(Mikro-)Gasturbinen (MGT) spielen im zukünftigen Energiesystem insbesondere als dezentrale Kraft-Wärme-(Kälte)-Kopplungsanlagen eine bedeutende Rolle. Aufgrund ihrer Lastflexibilität können Gasturbinen die räumliche und zeitliche fluktuierende erneuerbare Stromerzeugung ausgleichen und somit einen wesentlichen Beitrag zur Integration der steigenden Stromproduktion aus Wind und Photovoltaik leisten.

Ihre Brennstoffflexibilität ermöglicht sowohl den Einsatz von konventionellen Brennstoffen wie Erdgas als auch den Einsatz von regenerativen (z. B. regenerativ erzeugter Wasserstoff, Methan oder flüssige Kohlenwasserstoffe) und biogenen gasförmigen und flüssigen Brennstoffen (z. B. Biogas, Klärgas, Holzgas, Pyrolyseöl) bei äußerst geringen Schadstoffemissionen und gleichzeitig hoher Gesamteffizienz.

In Kombination mit einer Hochtemperaturbrennstoffzelle (MGT/SOFC Hybridkraftwerk) können elektrische

Wirkungsgrade von 60 % (Leistungsbereich < 100 kW) bis 70 % (Leistungsbereich > 1 MW) erreicht werden. Somit zählt das Hybridkraftwerk langfristig zu den Kraftwerkskonzepten mit den höchsten erreichbaren elektrischen Wirkungsgraden.

Innovative Kraftwerksprozesse (zum Beispiel auf Basis des invertierten Brayton Kreisprozesses) ermöglichen Mikrogasturbinen-Blockheizkraftwerk-Systeme mit elektrischen Leistungen kleiner 3 kW zum Einsatz im Einfamilienhaus. Weitere Konzepte wie die Kopplung von Gasturbine und Solarreceiver ermöglichen die tageszeit- und witterungsunabhängige Bereitstellung von elektrischer Energie bei hoher Nutzung der Solarstrahlung.

Zusätzlich eignen sich Mikrogasturbinen aufgrund der Leistungsdichte, Gewicht und Bauraum als „Auxiliary Power Unit“ oder „Range Extender“ im Transportbereich.

### Kontakte

#### DLR

Dr. Marina Braun-Unkhoff  
Tel.: 0711/6862-508  
marina.braun-unkhoff@dlr.de

Dr. Peter Kutne  
(Gasturbinen und KWK-Konzepte)  
Tel.: 0711/6862-389  
peter.kutne@dlr.de

Dr. Antje Seitz  
Tel.: 0711/6862-484  
antje.seitz@dlr.de

#### KIT

Prof. Dr.-Ing. Hans-Jörg Bauer  
Tel.: 0721/608-43240  
hans-joerg.bauer@kit.edu

### F&E für dezentrale (Mikro-)Gasturbinen

- weitere Verringerung der Minimallast
- Optimierung des Teillastbetriebs hinsichtlich elektrischer Effizienz und der CO-Emissionen
- Erweiterung der Brennstoffflexibilität hinsichtlich des Betriebs mit reinem Wasserstoff, biogenen Schwachgasen und flüssigen regenerativen Speicherstoffen, sowie schwierigen biogenen Stoffen (z. B. Pyrolyseöl)
- Entwicklung von Brennersystemen für große Heizwertbereiche (z. B. brennstoffflexible Brenner für den Einsatz von Erdgas und biogenen Schwachgasen)
- Entwicklung mehrstufig aufgeladener Prozesse und innovativer Kraftwerkskonzepte, die bei geringem Schadstoffausstoß und hoher Effizienz neue Anwendungsfelder eröffnen:
  - Hybridkraftwerk mit Kopplung von Mikrogasturbine und Brennstoffzelle für höchsten elektrischen Wirkungsgrad
  - invertierter Brayton Kreisprozess für Einfamilienhaushalte
  - solare Gasturbine zur Einbindung von solarer Wärme
- Effizienzsteigerung durch Optimierung der Einzelkomponenten und Einsatz neuer Materialien (keramische Bauteile, Beschichtungen)
- Erhöhung der Lebensdauer insbesondere der hochbelasteten Heißgaskomponenten in Bezug auf erhöhte Anzahl der Startvorgänge und Lastwechsel
- Reduktion der Herstellungskosten insbesondere der hochbelasteten Heißgaskomponenten

## Energieeffiziente Gebäude

*Forschungs- und Demonstrationsgebäude mit transluzentem textilem Dach, evakuierten Wärmedämmsystemen sowie innovativen Sonnenschutzeinrichtungen.  
© ZAE Bayern  
Foto: Petra Höglmeier*



### Kontakte

#### DBFZ

Dr.-Ing. Volker Lenz  
Tel.: 0341/2434-450  
volker.lenz@dbfz.de

#### DLR

Prof. Dr. Bernhard Hoffschmidt  
Tel.: 02203/601-3200  
bernhard.hoffschmidt@dlr.de

Dr. Martin Vehse

Tel.: 0441/99906-218  
martin.vehse@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Dr. Philipp Strauß  
Tel.: 0561/7294-144  
philipp.strauss@iee.fraunhofer.de

Dr. Dietrich Schmidt  
(Energiemanagement,  
gebäudeintegrierte PV)

Tel.: 0561/804-1871  
dietrich.schmidt@iee.fraunhofer.de

Dr. Michael Krause

Tel.: 0561/804-1875  
michael.krause@iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Sebastian Herkel  
(energieeffiziente Gebäude)

Tel.: 0761/4588-5117  
sebastian.herkel@ise.fraunhofer.de

Tilmann Kuhn

(solare Gebäudehüllen)

Tel.: 0761/4588-5297  
tilmann.kuhn@ise.fraunhofer.de

Wolfgang Graf

(Beschichtungen – Technologien  
und Systeme)

Tel.: 0761/4588-5946  
wolfgang.graf@ise.fraunhofer.de

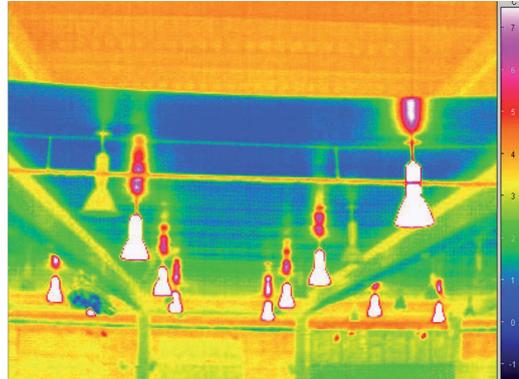
Derzeit fallen 38 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland in Gebäuden an. Davon entfallen 90 % auf Niedertemperaturwärme (< 80 °C), die schwerpunktmäßig für das Heizen eingesetzt wird. Energieeffizientes und solares Bauen kann und muss daher einen nennenswerten Beitrag bei der Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes und der Erreichung der Klimaschutzziele leisten.

- + Energiegewinne können durch passive Nutzung der Solarenergie erzielt werden.
- + Energieverluste durch die Hülle (Außenwände, Fenster, Boden und Dach) lassen sich durch Dämmungen, energieeffiziente Fenster und luftdichte Konstruktionen stark vermindern.
- + Energieverluste verursacht durch Luftwechsel oder warmes Abwasser lassen sich durch Wärmerückgewinnung mindern.
- + Bautechnische Energieeffizienz-Maßnahmen führen auch zu einer Erhöhung des Wohnkomforts.
- + Bei Neubau und im Zuge anstehender Sanierungen kann mit vergleichsweise geringen Mehrkosten der Effizienzstandard signifikant erhöht und ein nennenswerter Beitrag zur Einsparung von Treibhausgasemissionen generiert werden.
- + Moderne Gebäudetechnik erfüllt die Wärmeerwartungen der Nutzer durch angepasste Regelung effizient und effektiv und reduziert so deutlich den Endenergieeinsatz zur Deckung des Wärmebedarfs.
- + Wärmepumpensysteme und Kraft-Wärme-Kopplungssysteme stellen mit hoher Effektivität Wärme zur Verfügung. Durch ihre Kopplung mit dem Stromsektor können sie aktiv durch Erzeugung von Strom (KWK) oder als Last (WP) einen Beitrag zur Stabilisierung des Stromnetzes leisten.

- + Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Gebäudekonzepte, die das Ziel eines niedrigen oder negativen Primärenergieverbrauchs verfolgen: z. B. 3-Liter-Haus, Passivhaus, SolarAktivHaus, Null-Heizenergiehaus, Null-Energiegebäude oder Plus-Energiegebäude.
- + Ziel ist es, sowohl im Neubau als auch im Bestand Lösungen zu entwickeln, in denen eine energieeffiziente Gebäudehülle und hocheffiziente Haustechnik mit einem hohen Anteil an lokal verfügbaren erneuerbaren Energien kombiniert werden.
- + Der Einsatz von bauwerksintegrierten Photovoltaiklösungen (BIPV) bietet eine dezentrale Versorgung mit vor Ort erzeugter, sauberer und sicherer Energie.
- + Zukünftig werden Gebäude auch Anforderungen erfüllen müssen, die sich aus einem wachsenden Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien im Strommix ergeben. Hier können gebäudeintegrierte Wärme- und Stromspeicher einschließlich der thermischen Gebäudemasse eine wichtige Rolle spielen.

### Potenziale

Technisch können bis zu 80 % des Niedertemperaturwärmebedarfs mit verfügbaren Technologien reduziert werden. Unter realen Randbedingungen (Wirtschaftlichkeit, bauliche Einschränkungen, Eigentumsfragen etc.) sind im Schnitt Reduktionen um 50 % zu erwarten. Der verbleibende Bedarf muss vollständig mit erneuerbaren Energien gedeckt werden, um das Ziel der Dekarbonisierung zu erreichen.



**Low-e-Beschichtungen zum großflächigen Einsatz**  
 Unterdecke aus low-e-Membranen zur Reduktion der Kühlenergie in der Eissporthalle in Landsberg am Lech.  
 Rechts: Die Thermografie der Unterdecke verdeutlicht die „kältere reflektierende“ Wirkung der low-e-Schicht.  
 © ZAE Bayern

## Forschungs- und Entwicklungsbedarf für energieeffiziente Gebäude

Ziel der Forschung und Entwicklung ist es, den Energiebedarf im Gebäudebereich signifikant zu reduzieren und den verbleibenden Energiebedarf durch erneuerbare Energiequellen möglichst effizient zu decken.

- Hochwärmedämmende Vakuum-Dämmpaneele besitzen bei gleicher Dämmwirkung wie herkömmliche Dämmstoffe eine um den Faktor 5 bis 10 geringere Schichtdicke. Forschungsbedarf besteht insbesondere bei der Optimierung der Beständigkeit und der systemtechnischen Integration in das Gebäude und den Bauprozess.
- Dämmmaterialien und -systeme für die kostengünstige Sanierung von Altbauten (z. B. Dämmputze)
- Entwicklung solaroptimierter Fenster, die eine Überhitzung in den Sommermonaten verhindern und gleichzeitig für hohe Tageslichtnutzung sorgen (Vakuum-Isolierglas mit exzellenten Wärmedämmeigenschaften, verbesserte Wärmeschutzschichten mit hoher solarer Transmission, mikrostrukturierte Verglasung für Lichtlenkung und Sonnenschutz).
  - Systeme mit variablem Energiedurchlassgrad bieten effiziente Nutzung solarer Wärme im Winter bei gleichzeitiger Verschattung im Sommer (z. B. schaltbare Wärmedämmung)
  - Systeme, welche durch Integration von Phasenwechselmaterialien in lichtdurchlässigen Elementen die Funktionen Wärme-/Kältespeicherung und Tageslichtnutzung kombinieren
- Ersatz von fossil befeuerten Systemen durch Systeme, die Wärmequellen und -senken der Umwelt nutzen, wie Erdreich, Sonne, Außenluft oder Grundwasser (Niedrig-Exergie-Systeme = LowEx)
- Verminderung der Temperaturniveaus der Versorgungstechnik im Gebäude entsprechend der tatsächlichen Nutzeranforderungen (Niedertemperatursysteme, aktive Einzelraumregelung, aktive Berücksichtigung solarer Gewinne durch Prognose-Tools und prädiktive Regler, aktiv kontrollierte Be- und Entlüftung)
- weitgehend vollständige Wärmerückgewinnung und Kaskadennutzung der Energie (Abwasser, Abluft, Abwärme von Kühlgeräten)
- Entwicklung von Schnittstellensystemen, die ein einfaches technisches und regelungstechnisches Ändern der Haustechnik erlauben (Plug-and-Run).
- Digitalisierung der Haustechnik für leistungsfähigere Regelung und automatisierte Anpassung unter Berücksichtigung von Wetter und Nutzerverhalten/-wünschen
- Lichtlenk- und -verteilungssysteme zur besseren Nutzung der natürlichen Strahlung für die Beleuchtung, wodurch sich auch die Kühllast reduzieren lässt
- Planungsinstrumente für Beleuchtungskonzepte, die natürliche und künstliche Beleuchtung für die Nutzerbedürfnisse optimieren und zugleich in einer günstigen Wechselwirkung zum Gesamtenergiebedarf des Gebäudes stehen
- Entwicklung energieeffizienter Beleuchtungssysteme auf Basis von Hochleistungs-LEDs (Ablösung aller ineffizienteren Beleuchtung)
- Entwicklung von Funktionsmaterialien mit verbesserten Eigenschaften oder reduzierten Kosten: systematische Charakterisierung der physikalischen Eigenschaften neuer Bauelemente
- Methodenentwicklung zur energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden, auch unter Berücksichtigung denkmalgeschützter Bauten
- Entwicklung flächiger Wärmespeicher hoher Energiedichte für die Oberflächenintegration in Wänden und Decken (z. B. Phasenwechselmaterialien)

### HZB/PVcomb

Dr. Björn Rau  
 (BIPV)  
 Tel.: 030/8062-18153  
 bjoern.rau@helmholtz-berlin.de

### ISFH

Dr.-Ing. Federico Giovannetti  
 Tel.: 05151/999-501  
 f.giovannetti@isfh.de

Dr. Rolf Reineke-Koch  
 Tel.: 05151/999-431  
 r.reineke-koch@isfh.de

### IZES

Christoph Schmidt  
 Tel.: 0681/844 972-46  
 schmidt@izes.de

### KIT

Dr. Russell McKenna  
 Tel.: 0721/608-44582  
 russell.mckenna@kit.edu

Prof. Andreas Wagner  
 Tel.: 0721/608-46511  
 wagner@kit.edu

### ZAE Bayern

Dr. Hans-Peter Ebert  
 Tel.: 0931/70564-334  
 hans-peter.ebert@zae-bayern.de

Stephan Weismann  
 Tel.: 0931/70564-338  
 stephan.weismann@zae-bayern.de

### ZSW

Dr. Jann Binder  
 Tel.: 0711/7870-209  
 jann.binder@zsw-bw.de

- Neue Konzepte für die Gebäudehülle
  - Funktionale Materialien mit niedrigem thermischem Emissionsgrad zur Reduktion des Wärmeenergieeintrags im Sommer.
  - Entwicklung multifunktionaler Fassaden für Energieerzeugung und -speicherung, Sonnen- und Blendschutz, Schall- und Wärmedämmung, Sichtschutz und Tageslichtnutzung sowie Lüftung. Die Multifunktionalität der Bauelemente eröffnet Kostenreduktionspotenziale.
  - Optimierung von Photovoltaikelementen für den Einsatz in der Gebäudehülle. Konzepte für die Standardisierung und die Zulassung von BIPV-Modulen. Kombination von energieerzeugenden Solarmodulen mit den Anforderungen eines Bauelements. Entwicklung von Solarmodulen für besondere Beleuchtungsbedingungen (ungünstige Standorte, niedrige Bestrahlungsstärken).
- Entwicklung von SolarAktivHäusern, die zu 50% bis 100% regenerativ beheizt werden
- Ganzheitliche Energiekonzepte für Gebäude, die durch Lastmanagement und unter Ausnutzung lokaler Speicher eine hohe Kompatibilität zum zukünftigen Netzstrom aufweisen (Netzreaktive Gebäude)
- Weiterentwicklung und Verbreitung des Wissens um energieeffiziente Wärmeversorgungskonzepte in Mehrfamilienhäusern bei Eigentümern, Mietern und Versorgern im Kontext zentraler und dezentraler Wärmebereitstellung
- Qualitätssicherung Energieeffizienz:
  - Entwicklung von Planungs-, Bau- und Betriebsprozessen für die Felder Energieeffizienz und erneuerbare Energien im Gebäude
  - Entwicklung von automatisierten Inbetriebnahme- und Fehlererkennungsmethoden für gebäude-technische Systeme
- Erarbeiten von Vorschlägen für geeignete rechtliche und ökonomische Rahmenbedingungen und Anreize zur Erhöhung der energetischen Sanierungsrate

## Energieeffiziente Quartiere und Städte



links: **Green City Freiburg**  
© Green City Cluster Freiburg

rechts: **Solarsiedlung Freiburg**  
© Solarsiedlung GmbH

Städte sind wesentliche Verursacher und zugleich massiv Betroffene des anthropogenen Klimawandels. 80 % der von Menschen verursachten Treibhausgasemissionen und 75 % des Energie- und Ressourcenbedarfs entfallen auf Städte.

Gleichzeitig bietet die räumliche Nähe von Versorgern und Verbrauchern gute Voraussetzungen für die Umsetzung integrativer Energiekonzepte. Die Mehrzahl neuer Energietechnologien und Infrastrukturen wird in Städten implementiert werden, weshalb sie wichtige Akteure bei der Umsetzung der Energiewende sind. Ziel ist ein nachhaltiges, intelligentes städtisches Energiesystem, das den Endenergiebedarf minimiert und die Versorgung mit erneuerbarem Strom, Wärme, Kälte und Mobilität optimiert und folgende Kriterien erfüllt:

- Versorgung mit erneuerbaren Energien, die möglichst regional erzeugt werden
- hohe Energieeffizienz und -effektivität (systemdienlicher Einsatz)
- intelligente Infrastruktur und Steuerung der Erzeugung, Verteilung, Speicherung, Umwandlung und des Verbrauchs von Energie
- intelligente, auf die Verbraucher angepasste Dienstleistungsangebote (z. B. multimodale Mobilitätssysteme mit einer breiten Palette möglicher Verkehrsmittel)

Energieeffiziente Quartiere und Städte zeichnen sich aus durch:

- + systemisches Vorgehen und optimierte, konsistente Lösungen in der Kommune bei der Umsetzung der Energiewende
- + Nutzung von Synergieeffekten an den Schnittstellen des kommunalen Energiesystems zu Gebäuden, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung, Informationstechnologien, Mobilität, Stadtentwicklung, etc.
- + hohe Versorgungssicherheit und nachhaltige Energieversorgung in der Kommune
- + Wertschöpfung und Arbeitsplätze vor Ort statt Kaufkraftabfluss durch Energieimport
- + Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) zur intelligenten Steuerung von Infrastruktur und Stadtsystemen sowie Bereitstellung von nutzerfreundlichen Dienstleistungsangeboten

### Kontakte

#### DBFZ

Dr.-Ing. Volker Lenz  
Tel.: 0341/2434-450  
volker.lenz@dbfz.de

#### DLR

Prof. Dr. Bernhard Hoffschmidt  
Tel.: 02203/601-3200  
bernhard.hoffschmidt@dlr.de

Dr. Karsten von Maydell  
Tel.: 0441/99906-210  
karsten.maydell@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Dr. Dietrich Schmidt  
(Quartiersenergiekonzepte, Wärmenetze)  
Tel.: 0561/804-1871  
dietrich.schmidt@iee.fraunhofer.de

Dr. Christina Sager-Klauss  
Tel.: 0561/804-1874  
christina.sager-klauss@iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Gerhard Stryi-Hipp  
(Smart Cities)  
Tel.: 0761/4588-5686  
gerhard.stryi-hipp@ise.fraunhofer.de

#### HZB/PVcomB

Dr. Björn Rau  
Tel.: 030/8062-18153  
bjoern.rau@helmholtz-berlin.de

#### ISFH

Prof. Dr.-Ing. Oliver Kastner  
Tel.: 05151/999525  
kastner@isfh.de

#### IZES

Mike Speck  
Tel.: 0681/844 972-54  
speck@izes.de

Florian Noll  
Tel.: 0681/844 972-48  
noll@izes.de

**KIT**

Dr. Russell McKenna  
Tel.: 0721/608-44582  
russell.mckenna@kit.edu

Prof. Andreas Wagner  
Tel.: 0721/608-46511  
wagner@kit.edu

**UFZ**

Prof. Dr. Sigrun Kabisch  
Tel.: 0341/235-1237  
sigrun.kabisch@ufz.de

**Wuppertal Institut**

Prof. Dr. Manfred Fischedick  
(Systemanalyse in Modellregionen)  
Tel.: 0202/2492-121  
manfred.fischedick@wupperinst.org

Dr. Stefan Lechtenböhrer  
(Systemanalyse in Modellregionen)  
Tel.: 0202/2492-109  
stefan.lechtenboehrer@wupperinst.org

Dr. Johannes Venjakob  
(Klimagerechter Stadtbau)  
Tel.: 0202/2492-102  
Johannes.venjakob@wupperinst.org

**ZAE Bayern**

Dr. Jens Kuckelkorn  
Tel.: 089/329442-17  
jens.kuckelkorn@zae-bayern.de

Dr. Bastian Büttner  
Tel.: 0931/70564-231  
bastian.buettner@zae-bayern.de

**ZSW**

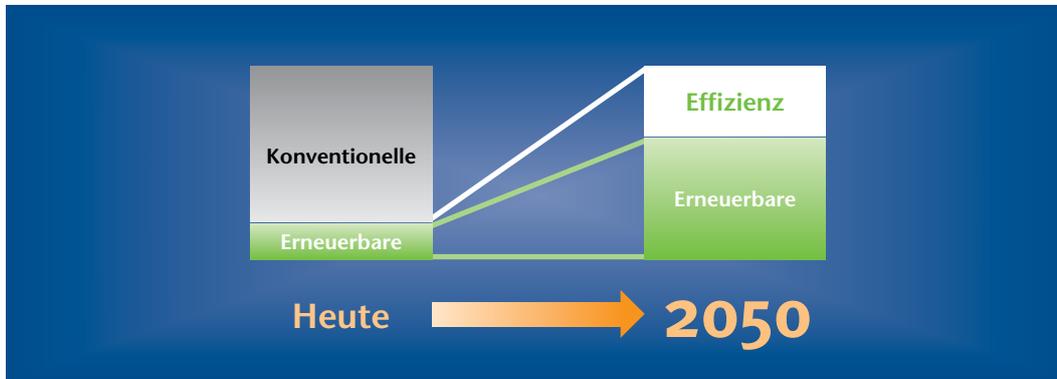
Dr. Jann Binder  
Tel.: 0711/7870-209  
jann.binder@zsw-bw.de

**Forschungs- und Entwicklungsbedarf für energieeffiziente Quartiere und Städte**

Technologische Herausforderungen liegen vor allem in der Integration kontinuierlich steigender Anteile dezentral erzeugter erneuerbarer Energie in die Energiesysteme bei zunehmender Koppelung der Energieinfrastrukturen für Strom, Wärme, Kälte und Mobilität. Konkreter Bedarf besteht in folgenden Bereichen:

- Weiterentwicklung von Simulationsinstrumenten zur Optimierung von Ziel-Energieszenarien und Umsetzungsfahrplänen für den Aufbau von Energiesystemen in Quartieren und Städten
- Smart Grid-Technologien zur Verknüpfung von intelligenten Netzen für Strom, Wärme, Kälte und Gas inklusive der Umwandlung der Energieträger ineinander
- IKT zur Kommunikation zwischen allen Akteuren und Komponenten im Energiesystem und anderen Infrastrukturen (Internet of Things) zur intelligenten Steuerung und Bereitstellung neuer Dienstleistungen über eine IKT-City-Plattform
- Konzepte zur optimierten Integration von Speichern für Strom, Wärme, Kälte und Gas auf Gebäude-, Quartiers-, Stadtteil- und Stadtebene
- Entwicklung von neuen Geschäftsmodellen und regulatorischen Rahmenbedingungen
- Entwicklung von Methoden zur aktiven Beteiligung der Bürger und aller anderen relevanten Akteure bei der Zielsetzung, Planung und Umsetzung der Transformation der Städte und Quartiere zu „Smart Cities“ einschließlich der Erfolgskontrolle
- Entwicklung von Monitoringtools und Strategien, um die Energiewende sozialverträglich umzusetzen und Energiearmut zu vermeiden
- Entwicklung multimodaler städtischer Mobilitätskonzepte mit steigendem Anteil von Fußwegen, Radwegen, öffentlichem Nahverkehr und Car-Sharing
- Konzeptentwicklung zur raschen Steigerung der Elektromobilität und deren Integration in die Infrastruktur von Quartieren und Städten und Transformation des Mobilitätssystems
- Methodenentwicklung zur Integration der Energiesystemtransformation in die Stadtentwicklungs- und Regionalplanung
- verbesserte Lösungen zur Speicherung und Verteilung sowie zum Lastmanagement von Wärme mit dem Ziel der Erhöhung der Anteile erneuerbarer Energien bei der Bereitstellung von Raum- und Prozesswärme.
- Konzepte zur Flexibilisierung und Optimierung bestehender Wärmenetze und deren Betrieb sowie intelligente Konzepte für neue Wärmenetze
- Entwicklung von Methoden zur Erfassung des Bestands unter Gesichtspunkten von Energieverbrauch und Nachhaltigkeit zur Erstellung von Quartiersentwicklungsplänen.

## Energieeffizienz in Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen



Effizienz und Erneuerbare  
für ein nachhaltiges Energiesystem  
© FVEE

**Energieeffizienz** kommt neben dem Ausbau der erneuerbaren Energien eine Schlüsselrolle bei der Energiewende zu: Laut Energiekonzept der Bundesregierung soll der Primärenergieverbrauch bis 2020 um 20% und bis 2050 um 50% im Vergleich zum Jahr 2008 sinken. Dafür müssen u. a. auch die ungenutzten Abwärmepotenziale in Industrie und Gewerbe gehoben werden.

Etwa 44% der in Deutschland verbrauchten Endenergie fallen auf die Bereiche Industrie sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD). Wiederum ca. 70% dieser Endenergie werden in Form von Wärme benötigt.

- + Durch die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen sowie den Einsatz von erneuerbaren Energien, wie zum Beispiel die Nutzung von Solarenergie oder Umweltwärme in Betriebsgebäuden, besteht hier ein großes Senkungspotenzial des Primärenergieverbrauchs.
- + Die Auswirkungen volatiler Märkte bei kritischen Rohstoffen werden gedämpft.
- + Die breite Erschließung vorhandener Effizienzpotenziale ist vorteilhaft schnell umsetzbar.
- + Durch Energie- und Ressourceneffizienz lassen sich Importe fossiler Energieträger vermindern.
- + Einsparung von Energiekosten durch Effizienzmaßnahmen, bzw. den Einsatz von Erneuerbaren.

### Potenziale

Viele Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien sind den fossil basierten bereits heute im Hinblick auf ihre lebenszyklusweite Ressourceneffizienz überlegen. Die Gesamtwirtschaft entwickelt sich in Richtung höherer Energie- und Ressourceneffizienz und die aktuellen politischen Vorgaben zielen auf eine Beschleunigung dieser Trends. Material- und Energieeffizienz werden auch bei Energiesystemen zunehmend zum Wettbewerbsfaktor.

In Industrie und GHD sind die meisten Systeme bislang selten auf einen energieeffizienten Betrieb hin optimiert, so dass es große, bislang ungehobene Energieeffizienzpotenziale gibt (z. B. Abwärmennutzung). Ebenso hoch wird das technische Potenzial für den Einsatz von Erneuerbaren, insbesondere in den Bereichen Strom, Niedertemperatur- und Prozesswärme sowie chemischer Grundstoffe geschätzt.

### Kontakte

#### DBFZ

Prof. Dr. Michael Nelles  
Tel.: 0341/2434-113  
michael.nelles@dbfz.de

#### DLR

Dr. Antje Seitz  
(Thermische Prozesstechnik)  
Tel.: 0711/6862484  
antje.seitz@dlr.de

Dr. Karsten von Maydell  
Tel.: 0441/99906-210  
karsten.maydell@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Dr. Bernd Krautkremer  
Tel.: 0561/7294-420  
bernd.krautkremer@iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Dr. Thomas Schlegl  
(Energiesystemanalyse)  
Tel.: 076/4588-5473  
thomas.schlegl@ise.fraunhofer.de

#### ISFH

Dr.-Ing. Federico Giovannetti  
(Solare Prozesswärme)  
Tel.: 05151/999-501  
f.giovannetti@isfh.de

#### IZES

Prof. Frank Baur  
(Ressourcennutzung)  
Tel.: 0681/844 972-59  
baur@izes.de

Patrick Hoffmann  
Tel.: 0681/844 972-39  
hoffmann@izes.de

**KIT**

Prof. Matthias Kind  
Tel.: 0721/608-42390  
matthias.kind@kit.edu

Dr. Peter Stemmermann  
Tel.: 0721/608-24391  
peter.stemmermann@kit.edu

**Wuppertal Institut**

Dr. Stefan Thomas  
(Energieeffizienz)  
Tel.: 0202/2492-143  
stefan.thomas@wupperinst.org

**ZAE Bayern**

Dr. Hans-Peter Ebert  
Tel.: 0931/70564-334  
hans-peter.ebert@zae-bayern.de

Gurtner Richard  
Tel.: 089/329442-14  
richard.gurtner@zae-bayern.de

**ZSW**

Maike Schmidt  
Tel.: 0711/7870-232  
maike.schmidt@zsw-bw.dew

**Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Energieeffizienz**

Herausforderung ist die Entwicklung wirtschaftlicher Konzepte zur Steigerung der Energieeffizienz sowie für den Einsatz von Erneuerbaren mit kurzen „industrieverträglichen“ Amortisationszeiten.

- Analyse verschiedener Industriebranchen zur Entwicklung branchenspezifischer Lösungen für Effizienzmaßnahmen sowie Integrationskonzepte für den Einsatz von Erneuerbaren sowie anschließendes Zusammenführen und Entwickeln branchenübergreifender Lösungen
- Entwicklung kostengünstiger und effizienter Komponenten für die Bereitstellung von erneuerbarem Strom und Wärme in diesen jungen Anwendungsbereichen
- Modularisierung von Technologien und Entwicklung innovativer Contracting-Modelle
- Entwicklung von Abwärmekonzepten unter Nutzung thermischer Energiespeicher und Wärmetransformation zur Re-Integration der Wärme in den Prozess oder zur Erzeugung von Strom oder Kälte
- Etablierung von Lebenszykluskosten zur Bewertung von Effizienzmaßnahmen
- Entwicklung gesamtwirtschaftlicher Modelle zur Kosten-Nutzen-Analyse von Effizienzmaßnahmen und deren Beschäftigungswirkung
- Modellentwicklungen zur Analyse von Wirkungen der Umsetzung beschleunigter Energieeffizienz im Vergleich zu Steuer- und Abgabenbefreiungen.
- Untersuchung von Rebound-Effekten und Entwicklung von Strategien zu deren Vermeidung.
- Demonstrationsforschung für Effizienztechnologien
- Grundlagen- und Demonstrationsforschung für thermoelektrische Elemente
- Erarbeitung von Gesetzesgrundlagen und Förderinstrumente für einen stärkeren Einsatz von Effizienztechnologien (KWKG, Gebäude-Klimaschutz-Gesetz)

## Nachhaltige Mobilität



**E-Fuhrpark**  
des IZES für die  
Mitarbeitenden  
© IZES

Für den Verkehr gibt es drei Nachhaltigkeitsstrategien:

- Vermeiden: Reduzierung von Ortsveränderungen bzw. Distanzen mit motorisierten Verkehrsmitteln
- Verlagern: Durchführung des verbliebenen Verkehrs mit umweltfreundlicheren Verkehrsmitteln
- Verbessern: technische und/oder organisatorische Verbesserungen des Verkehrs

Teil der Verbesserungsstrategie ist die Entwicklung von nachhaltigen Antriebstechnologien. Aus der Klimaschutzperspektive stellt Elektromobilität gegenwärtig die zentrale Lösungsoption für den Zweirad-, Pkw- und Busverkehr der Zukunft dar. Darüber hinaus sollen Anwendungen wie Lkw, Flugzeuge, Schiffe, Bahnen und mobile Arbeitsmaschinen durch Power-to-Fuel (PtF) Produkte klimaverträglich gemacht werden. Der Beitrag beider Lösungsoptionen zum Klimaschutz im Jahr 2050 hängt vom bis dahin erreichten erneuerbaren Anteil im Strommix und dem Ausbau der Versorgungsinfrastruktur ab.

- + Eine künftige Elektroflotte bietet das Potenzial, perspektivisch als Zwischenspeicher für Strom aus fluktuierenden erneuerbaren Quellen dienen zu können. Wie und in welchem Umfang dieses Flexibilisierungspotenzial gehoben werden kann, ist Gegenstand weiterer Forschungen.
- + Auch die Verwendung von Wasserstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge oder der Betrieb mit nachhaltig gewonnenem Methan erlaubt eine großtechnische Energiespeicherung und Netzflexibilisierung sowie eine nachhaltige Mobilität auch im Langstreckenverkehr.
- + Die Verwendung von PtF-Kraftstoffen verbindet die hohe Energiedichte mit einfacher Handhabung und dem weitgehenden Erhalt bewährter Antriebstechnologie und Versorgungsinfrastruktur.

Die theoretischen Marktpotenziale für Elektrofahrzeuge und PtF-Produkte sind hoch. Für die Marktdiffusion müssen die Kosten für Batterien bzw. Brennstoffzellen gesenkt, ihre Reichweite und Lebensdauer erhöht sowie die Ladeinfrastruktur für Strom bzw. Wasserstoff ausge-

baut werden. Zusätzlich können, vor dem Hintergrund autonomer Fahrsysteme, in Verbindung mit Brennstoffzellen- und Elektrofahrzeugen zukünftig gänzlich neue nachhaltige Mobilitätssysteme entstehen, die den Mobilitätsumfang zusätzlich vergrößern können. Die Bereitstellung von PtF-Produkten wird wesentlich durch Herausforderungen bei der CO<sub>2</sub>-Bereitstellung und Biomassenutzung sowie bei der noch aufzubauenen Erzeugungsinfrastruktur bestimmt.

Der Umstieg auf Elektromobilität bedeutet eine Systeminnovation, die Fahrzeugantriebe, Infrastrukturen, Energiebereitstellung und die gesamte Wertschöpfungskette im Automobilssektor umfasst.

Vereinfachend lassen sich diese nachhaltigen Antriebstypen unterscheiden:

- rein batterieelektrische Antriebe
- hybride Antriebe
- Wasserstoff-Brennstoffzellen-Elektroantriebe

Die Einführung von PtF-Kraftstoffen erfordert die Schaffung einer neuen Erzeugungsinfrastruktur zur Synthese und umfasst das folgende Produktspektrum:

- Methan als Compressed Natural Gas (CNG) oder als Liquefied Natural Gas (LNG)
- synthetische Kohlenwasserstoffe für Otto- oder Dieselmotoren
- sauerstoffhaltige Kohlenwasserstoffe wie Alkohole, Ether oder Ester (Oxygenate)

**Lithium-Ionen-Batterien** speichern Elektrizität (Elektronen) durch den Austausch von Lithiumionen (Li<sup>+</sup>) zwischen Anode und Kathode beim Laden und Entladen. Dabei erreichen sie eine im Vergleich zu anderen Akkus hohe spezifische Energiedichte.

- + Diese Fahrzeuge sind mit ihrem hohen Wirkungsgrad und ihrer lokalen Emissionsfreiheit ideale Stadt- und Lieferfahrzeuge. Die meist noch auf von 100–200 km begrenzte Reichweite und die notwendigen Ladezeiten sind für diese Anwendungen in der Regel kein

### Kontakte

#### DBFZ

Dr.-Ing. Franziska Müller-Langer  
Tel.: 0341/2434-423  
franziska.mueller-langer@dbfz.de

#### DLR

Dr. Alexander Dyck  
Tel.: 0441/99906-310  
alexander.dyck@dlr.de

Dr.-Ing. Stephan Schmid  
Tel.: 0711/6862-533  
stephan.schmid@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Dr. Philipp Strauß  
(Ladeinfrastruktur)  
Tel.: 0561/7294-144  
philipp.strauss@iee.fraunhofer.de

Dr. Stefan Bofinger  
(Energiewirtschaft und Systemdesign)  
Tel.: 0561/7294-371  
stefan.bofinger@iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Dipl.-Ing. Ulf Groos  
(Brennstoffzellensysteme)  
Tel.: 0761/4588-5202  
ulf.groos@ise.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Achim Schaadt  
(Thermochemische Prozesse zur Wasserstoffherzeugung)  
Tel.: 0761/4588-5428  
achim.schaadt@ise.fraunhofer.de

#### IZES

Hermann Guss  
Tel.: 0681/844 972-60  
guss@izes.de

Dr. Bodo Groß  
Tel.: 0681/844 972-851  
gross@izes.de

**Brennstoffzellenauto**  
an der Wasserstoff-Tankstelle  
am ZSW in Ulm  
© ZSW



### Jülich

Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten  
Tel.: 02461/61-3076  
d.stolten@fz-juelich.de

Dr.-Ing. Thomas Grube  
(Mobilität)  
Tel.: 02461/61-5398  
th.grube@fz-juelich.de

Prof. Dr.-Ing. Ralf Peters  
(Zukünftige Kraftstoffe)  
Tel.: 02461/61-4260  
ra.peters@fz-juelich.de

### KIT

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer  
(Mobile Arbeitsmaschinen)  
Tel.: 0721/608-48601  
marcus.geimer@kit.edu

Prof. Dr. Thomas Koch  
(Emissionsbildung, CO<sub>2</sub>-Reduzierung, Wirkungsoptimierung)  
Tel.: 0721/608-42430  
thomas.a.koch@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Jörg Sauer  
(Herstellverfahren für E-Fuels)  
Tel.: 0721/608-22400  
j.sauer@kit.edu

### Wuppertal

Dr. Karin Arnold  
(Erneuerbare Kraftstoffe)  
Tel.: 0202/2492-286  
karin.arnold@wupperinst.org

Georg Wilke  
(Elektromobilität)  
Tel.: 0202/2492-211  
georg.wilke@wupperinst.org

### ZAE Bayern

Stephan Vidi  
Tel.: 0931/70564-350  
stephan.vidi@zae-bayern.de

### ZSW

Maika Schmidt  
Tel.: 0711/7870-232  
maika.schmidt@zsw-bw.de

Prof. Dr. Werner Tillmetz  
Tel.: 0731/9530-0  
werner.tillmetz@zsw-bw.de

Problem. Es gibt auch schon Systeme mit Reichweiten bis zu 400 km. Zudem lässt die schnelle Entwicklung der Akkumulatoren erhebliche Effizienzsteigerungen und Preissenkungen erwarten.

**Brennstoffzellen** erzeugen mit Wasserstoff elektrischen Strom, der zum Antrieb eines Elektromotors eingesetzt wird. Der benötigte Kraftstoff wird im Fahrzeug in Druckgastanks mitgeführt.

- + Wasserstoff kann in entsprechenden Tanksystemen mit hoher Energiedichte transportiert werden. Daher ermöglichen Brennstoffzellenfahrzeuge Reichweiten von mehreren hundert Kilometern.
- + Durch die effiziente und emissionsfreie Umwandlung von Wasserstoff in elektrische Energie sind Brennstoffzellen vielversprechend für den CO<sub>2</sub>-freien Verkehr. Ihr Wirkungsgrad ist doppelt so hoch wie der von Verbrennungsmotoren.
- + Der Wasserstoff wird mittels großskaliger Elektrolyseanlagen effizient und in ausreichenden Mengen aus

erneuerbaren Energien erzeugt und erlaubt durch Speicherung in großvolumigen Salzkavernen die Entkopplung von regenerativem Stromangebot und Lastgang.

**Power-to-Fuel** liefert flüssige oder gasförmige Kraftstoffe aus Wasserstoff und Kohlendioxid oder Biomasseabfällen, die entweder die Eigenschaften mineralölbasierter Kraftstoffe aufweisen oder im Falle von Alkoholen bzw. Oxygenaten über vergleichbare oder bessere Eigenschaften verfügen.

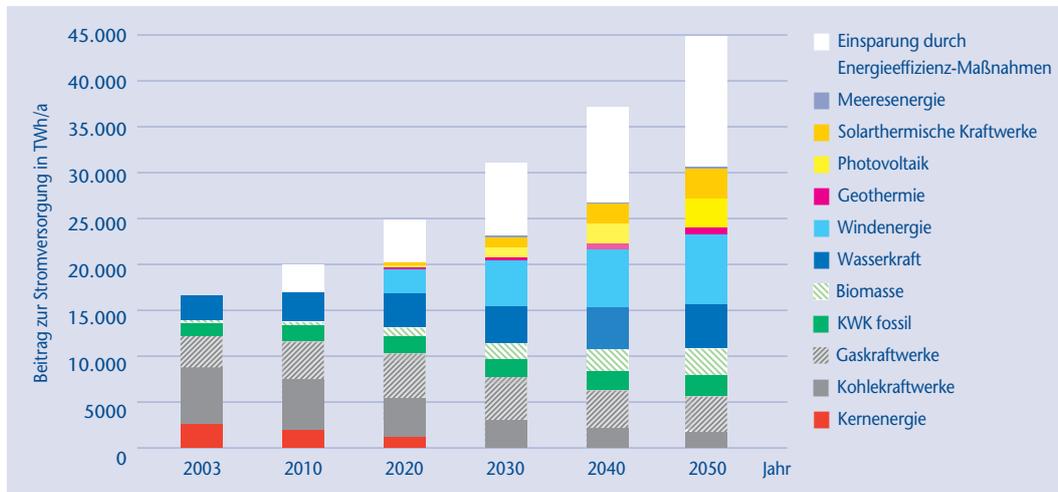
- + Die Leistungsfähigkeit der Fahrzeugantriebe bleibt weitgehend erhalten.
- + Das Nutzungsverhalten (Betankung, Sicherheit) bleibt weitgehend unverändert.
- + Die vorhandene Versorgungsinfrastruktur kann weiter genutzt werden.

Auf dem Weg zur nachhaltigen Mobilität haben Bundesregierung und Wirtschaft eine Kaufprämie für Elektrofahrzeuge auslobt. Daneben hat sich die H<sub>2</sub> Mobility Initiative darauf verständigt, das deutsche H<sub>2</sub>-Tankstellennetz bis 2023 auf 400 Stationen auszubauen. Die für Pkw, Kleintransporter und Busse anlaufende Markteinführung der Elektromobilität wird sich auf die Umstellung kleiner Nahverkehrszüge ausweiten. Weitere Verkehrsanwendungen zu Wasser und in der Luft werden folgen. Die Einführung von PtF-Kraftstoffen für Lkw, Flugzeuge, Schiffe, Bahnen und mobile Arbeitsmaschinen erlaubt einen klimaverträglichen Betrieb des erheblichen und wachsenden Transportsektors unter weitgehender Beibehaltung der Nutzungstechnologien und der Versorgungsinfrastruktur.

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Erarbeitung einer abgestimmten Gesamtstrategie zur stärkeren Verbreitung und Akzeptanz der Elektromobilität und PtF
- Anpassung von Rahmenbedingungen und Ausbau der Infrastruktur (u. a. Erarbeitung von Finanzierungsmechanismen)
- Untersuchungen zur Systemintegration von Elektromobilität (Vehicle-to-Grid, Smart Home, Batterie und Brennstoffzellen) und PtF (Synthesanlagen, CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Transport); für die Zukunft auch im Kontext automatisierter bzw. autonomer Fahrassistenzsysteme (Car-to-x Kommunikation)
- Kriterien wie Lebensdauer und Kosten, Sicherheit und Funktionalität müssen durchgängig verstanden und optimiert werden.
- Die Forschung erarbeitet Lösungen für die gesamte Bandbreite der Technologien, von Systemtechnik, Optimierung von Komponenten, Synthese neuer Materialien bis zu Fertigungstechnologien.
- Entwicklung eines neuen Produktspektrums für die breite Anwendung einer nachhaltigen Mobilität: Elektromotoren, Brennstoffzellen, Batterien, Systemtechnik, mit EE-/Biokraftstoffen betriebene Range Extender (Reichweitenverlängerer) sowie Ladeinfrastruktur und -konzepte wie Schnellladung und induktives Laden
- Anbindung an dezentrale Erzeuger wie PV- und KWK-Anlagen sowie die optimale Einbindung in das Stromnetz, auch zum Ausgleich von Fluktuationen und zur Netzstabilisierung
- Strategien für den effizienten Einsatz erneuerbarer Kraftstoffe sind zu entwickeln. Diese müssen im Einklang mit einer übergeordneten Biomasse-Allokationsstrategie stehen. Allerdings ist vor dem Einsatz solcher Energieträger vorrangig auf eine deutlich höhere Effizienz der Fahrzeuge sowie auf Möglichkeiten zur Reduktion des motorisierten Verkehrs zu achten.

## Energiesystemanalyse und Technologiebewertung



### Szenario

einer globalen nachhaltigen Stromerzeugung unter Berücksichtigung des 2 °C-Klimaschutzziels und vorrangigem Ausbau der erneuerbaren Energien (DLR): Beiträge der verschiedenen Energiequellen und Einsparungsbeitrag durch Effizienz-Maßnahmen  
© FVEE (Datenquelle DLR)

Systemanalytische Untersuchungen gewährleisten wissenschaftlich fundierte und belastbare Entscheidungshilfen und Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, die es erlauben, die Wirkungen der Einführung neuer Technologien rechtzeitig zu beurteilen. Energiesystemanalyse und Technikbewertung sind deshalb integrale Bestandteile der Forschungsstrategie des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien.

Energiesystemanalyse und Technikbewertung können die (politische) Entscheidungsfindung unterstützen und evaluieren; sie sind aufgrund ihrer ganzheitlichen Perspektive unverzichtbare Bestandteile in der Politikberatung. Zentrale Punkte sind:

- + ganzheitliche Perspektive statt Betrachtungen einzelner Technologien oder Komponenten
- + langfristig angelegte Analysen statt Kurzfristbetrachtungen
- + Aufzeigen von Wechselwirkungen zwischen einzelnen Systembausteinen
- + Darstellen einer Bandbreite von möglichen Energiezukünften und deren Auswirkungen unter Einbeziehung der komplexen Wechselwirkungen
- + Darstellen robuster Entwicklungen durch Bündelung von Energieszenarien (Meta-Analysen)
- + Umgang mit Unsicherheiten und Bereitstellen von Orientierungswissen

Die Entwicklung neuer Energietechnologien erfolgt innerhalb von „technologischen Innovationssystemen“, d. h. innerhalb eines komplexen Umfelds mit zahlreichen technischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen, ökologischen, klima- und energiepolitischen Rahmenbedingungen. Voraussetzung für eine erfolgreiche Markteinführung ist deshalb eine vorbereitende und flankierende Analyse dieser Zusammenhänge. Auch hierzu kann die Energiesystemanalyse einen Beitrag leisten.

Energiesystemanalyse basiert zentral auf Entwicklung und Einsatz von Energiemodellen. Mit diesen werden einzelne Prozesse, ganze Sektoren oder das gesamte Energiesystem in verschiedenen zeitlichen und räumlichen Auflösungen mathematisch abgebildet. Mittels Energiemodellen werden Energieszenarien ausgearbeitet, die mögliche Entwicklungspfade des betrachteten Systems aufzeigen. Sie schreiben auf der Basis eines konsistenten Sets von Annahmen explorativ schon heute angelegte Trends in die Zukunft fort oder zeigen auf, wie vorgegebene Ziele (wie z. B. Treibhausgasreduktion) mittels des Zusammenspiels bestehender oder neuer Energietechnologien erreicht werden können.

In Ergänzung zu modell-basierten Energieszenarien spielen auch Kontextszenarien eine relevante Rolle bei der Analyse möglicher Transformationspfade. Kontextszenarien erfassen konsistent mögliche für das Energiesystem relevante gesellschaftliche Prozesse.

Jenseits der Entwicklung von Energieszenarien kommt der multi-kriteriellen Bewertung von Technologien eine wichtige Bedeutung zu. Dies betrifft die Bewertung der Zukunftsperspektiven bestehender und neuer Energietechnologien und -systeme – sei es hinsichtlich ihres Einsatzpotenzials oder der ökologischen, ökonomischen, technischen, gesellschaftlichen oder rechtlichen Bedingungen und Folgen ihres Einsatzes.

Ein weiterer Baustein der Systemanalyse ist das Monitoring. Während der Umsetzungsphase werden Energietechnologien und -systeme ebenso wie die gewählten Förderinstrumente häufig von einem Monitoring begleitet. Diese kontinuierliche und umfassende Bewertung ermittelt Chancen und Risiken des fortschreitenden Umsetzungsprozesses, hilft mögliche Fehlentwicklungen rechtzeitig zu erkennen und alternative Lösungsansätze zu erarbeiten.

### Kontakte

#### DBFZ

Prof. Dr. Michael Nelles  
Tel.: 0341/2434-113  
michael.nelles@dbfz.de

Dr. Nora Szarka  
Tel.: 0341/2434-489  
nora.szarka@dbfz.de

#### DLR

Carsten Hoyer-Klick  
Tel.: 0711/6862-728  
carsten.hoyer-klick@dlr.de

Prof. Dr. André Thess  
Tel.: 0711/6862-358  
andre.thess@dlr.de

Dr. Thomas Vogt  
Tel.: 0441/99906-103  
t.vogt@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Dr. Stefan Bofinger  
(Energiesystemanalyse und -design)  
Tel.: 0561/7294-371  
stefan.bofinger@iee.fraunhofer.de

Dr. Philipp Strauß  
(Technologiebewertung, elektrotechnische Komponenten)  
Tel.: 0561/7294-144  
philipp.strauss@iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Dr. Thomas Schlegl  
(Energiesystemanalyse)  
Tel.: 05151/4588-5473  
thomas.schlegl@ise.fraunhofer.de

#### ISFH

Dr. Raphael Niepelt  
Tel.: 05151/999-403  
niepelt@isfh.de

Prof. Dr.-Ing. Oliver Kastner  
Tel.: 05151/999-525  
kastner@isfh.de

**IZES**

Eva Hauser  
Tel.: 0681/844 972-45  
hauser@izes.de

**Jülich**

Jürgen-Friedrich Hake  
Tel.: 02461/61-3161  
j.-f.hake@fz-juelich.de

Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten  
Tel.: 02461/61-3076  
d.stolten@fz-juelich.de

**KIT**

Dr. Witold-Roger Poganietz  
Tel.: 0721/608-28180  
witold-roger.poganietz@kit.edu

Dr. Christine Rösch  
Tel.: 0721/608-22704  
christine.roesch@kit.edu

**UFZ**

Prof. Dr.-Ing. Daniela Thraen  
Tel. 0341/2434-435  
daniela.thraen@ufz.de

**Wuppertal Institut**

Prof. Dr. Manfred Fischedick  
(Systemanalyse und  
Modellbildung)  
Tel.: 0202/2492-121  
manfred.fischedick@wupperinst.org

Prof. Dr. Stefan Lechtenboehmer  
(Modellbildung und Szenarien,  
low-carbon Industrie)  
Tel.: 0202/2492-216  
stefan.lechtenboehmer@  
wupperinst.org

Dr. Peter Viebahn  
(Technikbewertung)  
Tel.: 0202/2492-306  
peter.viebahn@wupperinst.org

**ZAE Bayern**

Dr. Matthias Rzepka  
Tel.: 089/329442-31  
matthias.rzepka@zae-bayern.de

**ZSW**

Maike Schmidt  
Tel.: 0711/7870-232  
maike.schmidt@zsw-bw.de

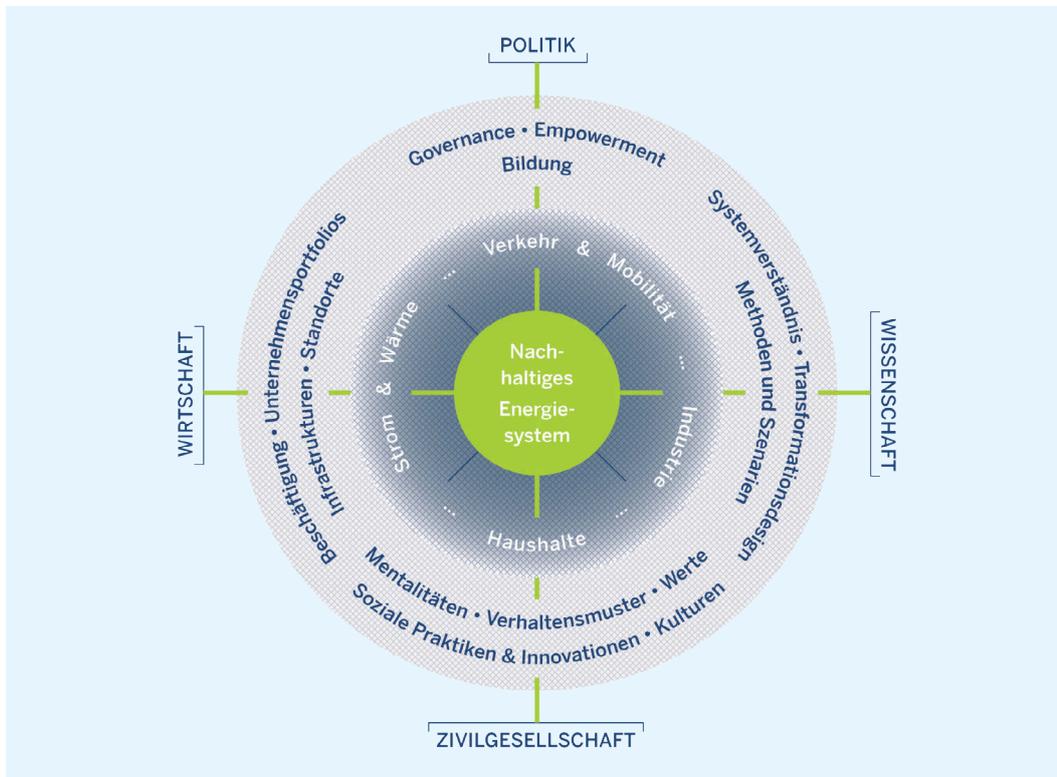
Anna-Lena Fuchs  
Tel.: 0711/7870-353  
anna-lena.fuchs@zsw-bw.de

Zu beachten sind dabei gleichermaßen ökonomische, ökologische und soziale Aspekte. Hierzu gehören Fragen der Versorgungssicherheit, der Wettbewerbsfähigkeit ebenso wie Beiträge für die internationale Klimaschutzpolitik sowie die Unterstützung der Energiewende durch erhöhte Energie- und Ressourceneffizienz.

**Forschungsbedarf für Energiesystemanalyse und Technologiebewertung**

- Modellrechnungen und Szenarien für die zukünftige Energieversorgung unter besonderer Berücksichtigung der Energiewende in Deutschland und international, wobei neben der techno-ökonomischen Perspektive auch gesellschaftliche Prozesse beachtet werden
- Multi-kriterielle Bewertung technologischer Innovationen zur nachhaltigen Energieversorgung unter Berücksichtigung nicht-technischer Aspekte nachhaltiger Entwicklung.
- optimaler Energiemix im Strom-Wärme-Mobilitäts-System für die verschiedenen Transformationsphasen
- Erweiterung der Energieszenarien um Fragen der Sektorkopplung (Speicher, Netze, Power-to-X)
- Erneuerbare Energien-Szenarien mit Untersuchung von Marktdesign, Akteuren und Fördermaßnahmen
- Integration von Akzeptanzfragen und Verhaltensmuster u. a. „weichen“ Aspekten in Energieszenarien
- Technisch-ökonomische Bewertung von Energietechnologien – Wettbewerbsfähigkeit von Technologien und Anwendungen, Lernkurven, Trends, Technologieanalysen für Investitionsentscheidungen
- Ökobilanzen und Analyse der räumlichen Umweltauswirkungen, Ressourcen- und Resilienzfragen
- Potenzialanalyse erneuerbarer Energien und Kraftwerkseinsatzplanung für Wärme, Strom und Speichernutzung
- Entwicklung von Markteinführungs- und Marktdurchdringungsstrategien auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Ebenen
- Umfeld- und Systemanalysen zur Unterstützung von Forschungsplanung und Forschungsbegleitung
- Evaluierung von Wertschöpfungsketten von Energietechnologien für Strategien zur Industrieentwicklung, Untersuchung von Ressourcenfragen, Bewertung von nationalen Maßnahmen zur FuE- und Industrieförderung
- Marktanalysen von erneuerbaren Energietechnologien: Potenzialerschließung und Markteintrittsstrategien, Investitionsplanungen und Investitionshemmnisse, Betrachtung makroökonomischer Effekte

## Akzeptanz- und Transformationsforschung



**Die Energiewende als gesellschaftliche Transformationsaufgabe:**  
 Perspektiven und Anforderungen der gesellschaftlichen Gruppen auf dem gemeinsamen Weg der Energiewende  
 Quelle: Fischek et al. (2014)

### Kontakte

#### DLR

Dr. Thomas Vogt  
 Tel.: 0441/99906-103  
 t.vogt@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Prof. Dr. Clemens Hoffmann  
 Tel.: 0561/7294-345  
 clemens.hoffmann@iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Dr. Sebastian Gözl  
 Tel.: 0761/4588-5228  
 sebastian.goelz@ise.fraunhofer.de

#### ISFH

Dr. Raphael Niepelt  
 Tel.: 05151/999-403  
 niepelt@isfh.de

#### IZES gGmbH

Prof. Dr. Petra Schweizer-Ries  
 Tel.: 0681/844 972-0  
 schweizer-ries@izes.de

Jan Hildebrand  
 Tel.: 0681/844 972-29  
 hildebrand@izes.de

#### KIT

Dr. Dirk Scheer  
 Tel.: 0721/608-22994  
 dirk.scheer@kit.edu

#### UFZ

Prof. Dr. Matthias Groß  
 Tel.: 0341/235-1746  
 matthias.gross@ufz.de

Prof. Dr. Wolfgang Köck  
 Tel.: 0341/235-1257  
 wolfgang.koec@ufz.de

#### Wuppertal Institut

Dr.-Ing. Kurt Berlo  
 (Bürgercontracting)  
 Tel.: 0202/2492-174  
 kurt.berlo@wupperinst.org  
 Katja Pietzner  
 (gesellschaftliche Akzeptanz)  
 Tel.: 0202/2492-218  
 katja.pietzner@wupperinst.org

Die Energiewende kann als komplexes Zusammenspiel von sozialen, technologischen, wirtschaftlichen und politischen Innovationsprozessen verstanden werden. Für die wissenschaftliche Begleitung der Energiewende ist daher eine ganzheitliche thematische Herangehensweise notwendig, die über die Erforschung rein technischer und ökonomischer Fragestellungen hinausgeht. Sie erfordert einen transformativen Forschungsansatz, der interdisziplinär unterschiedliche Wissenschaftsdisziplinen vernetzt und darüber hinaus auch die nichtwissenschaftlichen Akteure einbezieht, um umsetzbare und erfolgversprechende Handlungsempfehlungen zu erarbeiten.

Die Energiewende kann nur als Gemeinschaftswerk von Bürgern, Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Wissenschaft gelingen. Diese Akteursvielfalt mit multiplen Rollen, Perspektiven und Verantwortlichkeiten bedingt eine Reihe an Interessen-, Ziel- und Ebenenkonflikten zwischen den involvierten Gruppen. Ebenso ist für die Umsetzung der avisierten Veränderungsmaßnahmen eine breite Akzeptanz möglichst vieler unterschiedlicher gesellschaftlicher Akteursgruppen notwendig. Dabei ist es nicht ausreichend, ausschließlich auf die öffentliche Akzeptanz im Sinne der Zustimmung innerhalb der Bevölkerung oder betroffener Anwohner zu zielen, vielmehr bedarf es ebenso der aktiven Unterstützung, der

klaren Positionierung und des positiven Wirkens übergeordneter Entscheidungsträger aus Politik, Verwaltung und Wirtschaft. Dies gilt sowohl für Energieerzeugung als auch -nutzung.

Einen besonderen Akzeptanzfaktor stellen die Beteiligungsmöglichkeiten für alle Akteursgruppen in energie-relevanten Planungs- und Entscheidungsprozessen dar. Trotz existierender politischer Willensbekundungen und einiger guter Ansätze findet die tatsächliche Umsetzung von Beteiligungsstrategien in der Praxis nur bedingt statt. Es bedarf folglich ganzheitlicher Konzepte und Strategien, welche die akzeptanzrelevanten Faktoren akteurspezifisch erfassen, die verhaltenswirksamen Rahmenbedingungen berücksichtigen und beteiligungsorientierte Lösungsansätze ermöglichen.

Weiterhin bedarf es eines Kompetenzaufbaus auf Seiten der Verfahrensträger. Die Berücksichtigung der Bewertungs- und Verhaltensebenen ermöglicht die Entwicklung abgestimmter Anlagenkonzepte, nutzerorientierte Technologieentwicklungen sowie die Förderung von nachhaltigen Energieverbrauchsmustern. Die Schaffung einer konstruktiven Dialogkultur sowie der Vorrang offener Diskussionen und Entscheidungen sind wichtige Ziele für die Umsetzung der Energiewende.

Transformations- und Akzeptanzforschung bieten:

- + Die Akzeptanzforschung untersucht die Interessen, Verhaltensmuster und sozialen Praktiken der verschiedenen gesellschaftlichen Akteure wie Marktteilnehmenden oder der politischen Entscheidenden. Es wird z. B. analysiert, wie neue Technologien in konkreten gesellschaftlichen Umfeldern wirken, und welche Kooperationsmöglichkeiten es zwischen Politik und Unternehmen zur Gestaltung von Transformationsprozessen gibt
- + Diese Forschungen sind zunehmend interdisziplinär und beinhalten das Zusammenspiel verschiedener Disziplinen wie Soziologie, Psychologie, Geographie oder Verhaltensökonomie.
- + Transformations- und Akzeptanzforschung erleichtern die Aktivierung von Bürgerinvestitionen in die Energiewende.
- + Transdisziplinäre Forschung liefert Beiträge zur Lösung gesamtgesellschaftlich relevanter Probleme. Sie trägt dazu bei, dass gesellschaftlicher Wandel realisiert werden kann und zugleich kritisch begleitet wird.

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Akzeptanz- und Transformationsforschung

- Verbesserung der Planungsergebnisse durch lokales Wissen und Multi-Akteurs-Perspektiven
- Erhöhung der Legitimität von Verfahren und Entscheidungen durch Beteiligung,
- Demokratisierung des Energiesystems
- partizipative Forschungsansätze: Etablierung von Qualitätskriterien und Standards „guter“ Beteiligung
- sozialwissenschaftliche und rechtswissenschaftliche Betrachtung der Integration von formellen und informellen Beteiligungsprozessen bei Planungsverfahren von Energieinfrastruktur sowie der Umsetzung von finanziellen Teilhabemodellen
- systematische multi-methodale Längsschnittuntersuchungen von Akzeptanzentwicklungen in Ergänzung zu bestehenden Fallstudien
- Gerade bei der ländlichen Elektrifizierung ist ein besseres Verständnis sozio-ökonomischer und soziologisch-technischer Zusammenhänge nötig. In neuen Konzepten und Produkten müssen diese Erkenntnisse mit moderner Leistungs- und Regelungselektronik verbunden werden.
- Untersuchungen zu sozio-ökonomischen Effekten von Steuer- und Regulierungsinstrumenten für die Sektorkopplung im Strom-Wärme-System
- Wenn die energiebezogene Mentalitäten, Verhaltensmuster und soziale Praktiken der Bürger bekannt sind, kann gezielter auf akzeptable Maßnahmen zur Umsetzung der Energiewende hingewirkt werden.

# Energiewirtschaft



**Strommärkte während der Systemtransformation:**  
Funktionen und notwendige Strukturen  
Grafik: IZES gGmbH

Die wachsende Bedeutung der erneuerbaren Energien führt notwendiger Weise auch zu einem Wandel der Energiewirtschaft und erfordert eine kontinuierliche Anpassung des Designs der Energiemärkte und der Regulierung. Die Erneuerbaren stellen mittlerweile einen nicht unerheblichen Wirtschaftsfaktor dar, gleichzeitig beeinflussen sie das Geschehen an den Energiemärkten und das Marktumfeld für die konventionelle Energiewirtschaft.

Die Ausgestaltung der regulatorischen Rahmenbedingungen für Energiemärkte ist ein Instrument zur Erreichung gesellschaftlicher Ziele. Im Energiesektor kommen regulierten Märkten unterschiedliche Steuerungsfunktionen zu:

- (Regulierte) Märkte sollen kurz- und langfristig Versorgungssicherheit gewährleisten. Dahinter liegt die Vorstellung, dass Märkte Preissignale aussenden, die jederzeit zur Befriedigung der Nachfrage nach Energie führen und gleichzeitig für einen ressourcenschonenden Einsatz der eingesetzten Güter sorgen.
- Gleichzeitig besteht die Anforderung, dass Märkte hinreichende und ausreichend stabile Investitionsbedingungen für die darin agierenden Akteure bereitstellen sollen. Dabei sind auch Anreize für institutionelle, organisatorische und technische Innovationen zu berücksichtigen.
- Einige Energietechnologien bergen Risiken für Gesundheit und Ökosysteme, die unter den bisherigen Marktbedingungen nicht (ausreichend) kompensiert und somit auch nicht in das Entscheidungskalkül des Verursachers einbezogen werden.

Das zunehmende Auftreten dieser sogenannten externen Kosten muss durch Anpassungen marktlicher Rahmenbedingungen bzw. durch politisch flankierende Regelungen für die Energiewirtschaft verhindert oder zumindest stark gemindert werden. Ein Beispiel für die monetäre Berücksichtigung externer Kosten wäre ein angemessen hoher Preis für CO<sub>2</sub>-Emissionen, der tatsächlich Marktwirkung erzielt.

- Die gesellschaftlich gewollte Transformation des Energiesystems schafft zusätzliche Herausforderungen für die Energiewirtschaft: Die zunehmende – vorwiegend volatile – Einspeisung erneuerbarer Energien und die Verfolgung ambitionierter Klimaschutzziele erfordern eine Weiterentwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen für Energiemärkte.

Die energiewirtschaftliche Forschung analysiert, ob und unter welchen Voraussetzungen Märkte die an sie gestellten gesellschaftlichen Anforderungen erfüllen bzw. erfüllen können. Sie untersucht daher die Funktionsweisen und das Zusammenspiel der verschiedenen Teilmärkte des Energiesektors, die techno-ökonomischen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Energietechnologien und die konkreten Ergebnisse des Agierens der Marktakteure. Sie kann auch vergleichend arbeiten, in dem sie die verschiedenen Rahmenbedingungen (z. B. in mehreren Ländern) miteinander vergleicht und Vor- und Nachteile analysiert.

## Kontakte

### DLR

Prof. Dr. Carsten Agert  
Tel.: 0441/99906-100  
carsten.agert@dlr.de

Carsten Hoyer-Klick  
Tel.: 0711/6862-728  
carsten.hoyer-klick@dlr.de

Prof. Dr. André Thess  
Tel.: 0711/6862-358  
andre.thess@dlr.de

### Fraunhofer IEE

Prof. Dr. Clemens Hoffmann  
Tel.: 0561/7294-345  
clemens.hoffmann@iee.fraunhofer.de

Dr. Stefan Bofinger  
(energiewirtschaftliche Analysen)  
Tel.: 0561/7294-371  
stefan.bofinger@iee.fraunhofer.de

### Fraunhofer ISE

Dr. Christoph Kost  
Tel.: 0761/4588-5750  
christoph.kost@ise.fraunhofer.de

### ISFH

Prof. Dr.-Ing. Oliver Kastner  
Tel.: 05151/999-525  
kastner@isfh.de

### IZES

Eva Hauser  
Tel.: 0681/844 972-45  
hauser@izes.de

### Jülich

Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten  
Tel.: 02461/61-3076  
d.stolten@fz-juelich.de

**KIT**

Prof. Dr. Wolf Fichtner  
Tel.: 0721/608-44462  
wolf.fichtner@kit.edu

**UFZ**

Prof. Dr. Erik Gawel  
(Klima- und Energiepolitik)  
Tel.: 0341/235-1940  
erik.gawel@ufz.de

Dr. Paul Lehmann  
(Klima- und Energiepolitik)  
Tel. 0341/235-1076  
paul.lehmann@ufz.de

**Wuppertal Institut**

Prof. Dr. Manfred Fishedick  
(Markteinführungsstrategien)  
Tel.: 0202/2492-121  
manfred.fishedick@wupperinst.org

Sascha Samadi  
(Energieszenarien und  
energiewirtschaftliche Analysen)  
Tel.: 0202/2492-107  
sascha.samadi@wupperinst.org

**ZSW**

Maike Schmidt  
Tel.: 0711/7870-232  
maike.schmidt@zsw-bw.de

Henning Jachmann  
Tel.: 0711/7870-345  
henning.jachmann@zsw-bw.de

Tobias Kelm  
Tel.: 0711/7870-250  
tobias.kelm@zsw-bw.de

Für politische wie wirtschaftliche Entscheidungen und die Schaffung eines förderlichen marktlichen Rechtsrahmens leistet die energiewirtschaftliche Forschung wertvolle Beiträge:

- + Entwicklung mittel- und langfristiger Energieszenarien zur Analyse der Entwicklungsmöglichkeiten des Energiesystems
- + Durchführung von Marktanalysen
- + Erstellung von Wirtschaftlichkeits- und Machbarkeitsstudien
- + Untersuchungen, inwieweit Marktdesigns den Anforderungen der Energiewende gerecht werden und wie sie gegebenenfalls zu ändern oder zu ergänzen sind

- + Untersuchung der zunehmenden Wechselwirkungen zwischen den Sektoren (Sektorkopplung)
- + Entwicklung und Evaluierung von Instrumenten und Maßnahmenbündeln
- + möglichst effiziente System- und Marktintegration der erneuerbaren Energien
- + Analysen zur Einführung von Flexibilitätsoptionen zur Gewährleistung der Systemsicherheit bei weiterem Ausbau der Erneuerbaren
- + Entwicklung dezentraler Marktstrukturen und Analyse möglicher Wechselwirkungen
- + Untersuchungen zur Entwicklung der Energienachfrage unter Berücksichtigung der erwarteten Durchführung von Effizienzmaßnahmen

**Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Energiewirtschaft**

Im Rahmen energiewirtschaftlicher Betrachtungen werden z. B. Fragen nach der heutigen oder zukünftigen Wirtschaftlichkeit und den ökonomisch relevanten Umwelteffekten (z. B. THG-Emissionen bzw. THG-Minderungseffekten) einzelner Technologien untersucht. Oder es wird analysiert, welche Änderungen der politischen Rahmenbedingungen notwendig sind, um gesellschaftlich gewünschten Technologien zum Durchbruch zu verhelfen. Dabei werden auch verschiedene (geographisch oder sachlich) abgegrenzte Märkte untersucht, in denen verschiedene Energietechnologien und ihre Anbieter agieren. Somit bestehen viele Verbindungen zur energiepolitischen Analyse. In der perspektivischen Betrachtung werden dann Vorschläge gemacht, wie diese Segmente neu gestaltet werden können, um sich gewünschten technologischen Entwicklungen zu öffnen.

Wesentliche energiewirtschaftliche Fragestellungen:

- Untersuchung der Wirtschaftlichkeit einzelner Technologien
- Identifikation von Möglichkeiten, um die Wirtschaftlichkeit einzelner Technologien beeinflussen zu können
- Energiesystemanalyse zur Untersuchung der Wechselwirkungen verschiedener Energietechnologien unter verschiedenen regulatorischen Rahmenbedingungen bzw. Marktdesigns
- Analyse der Ausgestaltungsmöglichkeiten des Energiemarktdesigns mit hohen Anteilen volatiler Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und zunehmenden Zeitspannen mit Grenzkosten von Null oder unter Null

- Untersuchung der regulatorischen Rahmenbedingungen für diverse Teilmärkte zur Förderung der Markt- und Systemintegration von volatilen erneuerbaren Energien (Wind, Solar) sowie komplementären Flexibilitätsoptionen (flexible konventionelle und erneuerbare Stromerzeugung, Speicher, Nachfragemanagement)
- Untersuchung zur Notwendigkeit neuer Marktsegmente (z. B. Kapazitätsmärkte)
- Analyse des Energiemarktes, um Novellierungen von energiewirtschaftlich relevanten Gesetzen wie EEG und KWKG im Sinne des Transformationskonzepts zu gestalten
- Analyse möglicher dezentraler Marktstrukturen und Wechselwirkungen mit zentralen Großhandelsmärkten
- Analyse der Wirksamkeit spezifischer Maßnahmen und Instrumente auf der Seite der Energieeffizienzsteigerung (z. B. Energieeinsparverordnung)
- Konzepte für den Energiehandel und -transport zwischen großen Leistungsquellen (Windparks, ländlichen Regionen) und Leistungssenken (Industrie, Ballungszentren)
- Analyse von aktorspezifischen Interessen
- Untersuchung sinnvoller Netzstrukturen auch im europäischen Kontext
- Interdisziplinäre Analyse des Verhaltens von Akteuren
- Analyse der Entwicklung der Energienachfrage unter Berücksichtigung von Effizienzmaßnahmen und der Sektorkopplung

## Energiepolitik und Energierecht



**Reichstagsgebäude**  
mit Kalt- und Warmwasserspeicher  
© Geothermie Neubrandenburg GmbH

Die Transformation des Energiesystems muss aktiv gesteuert und moderiert werden, um erfolgreich umgesetzt zu werden. Die Politik muss die entsprechenden Rahmenbedingungen setzen, diese regelmäßig evaluieren und die Politikinstrumente den aktuellen Entwicklungen anpassen.

Technische Entwicklungen sind stets verwoben mit dem aktuellen wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und politischen Kontext. Dabei beeinflusst die Gesellschaft die Suche nach und die Identifikation von neuen technologischen Lösungen; umgekehrt müssen Wirtschaft, Gesellschaft und Politik die technologische Entwicklung in ihre vielfältigen Entscheidungen einbeziehen. Gerade die gesellschaftlich angestrebte Energiewende kann daher nur vollständig erforscht und wissenschaftlich begleitet werden, wenn soziologische, politikwissenschaftliche, ökonomische und juristische Aspekte gleichrangig betrachtet werden.

Die energiepolitische und -rechtliche Forschung leistet wertvolle Beiträge für politische Entscheidungen und die Schaffung eines förderlichen marktlichen und politischen Rechtsrahmens:

- + Analyse von Defiziten des bestehenden politischen/ rechtlichen Rahmens
- + (Weiter-)Entwicklung und Evaluierung von Instrumenten und Maßnahmenbündeln: Analyse der Wirkung, Nutzen und Kosten

Die Forschung untersucht, welche Politikstrategien und -instrumente zielführend und nachhaltig sind. Dabei sind die Akteure auf allen politischen Ebenen angesprochen, angefangen bei den Kommunen, in der Landes- und Bundespolitik, auf EU- und internationaler Ebene. Der Politik bleibt es vorbehalten, die richtigen Rahmenbedingungen zu setzen, um die energie- und klimapolitischen Ziele zu erreichen. Das beginnt bei der Forschungsförderung, reicht über wirtschaftliche Anreize und die Unterstützung der Markteinführung neuer Technologien bis hin zur Verbraucherinformation oder gesetzlichen Vorgaben.

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Energiepolitik und -recht

- Die juristische Analyse des Energiesektors untersucht die Einwirkungen und gegenseitigen Verflechtungen der verschiedenen Rechtsebenen (von der EU bis zur kommunalen Ebene) und -bereiche (vom Energiewirtschaftsrecht über das Energieumweltrecht bis hin zum Raumplanungsrecht). Sie untersucht, wie geltendes Recht gegebenenfalls an neue technologische Entwicklungen angepasst werden könnte und bewertet mögliche Gesetzesvorschläge in Bezug auf ihre Vereinbarkeit mit höherrangigem Recht, Zweckdienlichkeit und Angemessenheit bzw. unterstützt bei der Erarbeitung neuer Gesetze.
- Die energiepolitische Analyse untersucht, warum die Segmente des Energiesektors ihre gegenwärtige Beschaffenheit erhalten haben. Hierzu gehört eine akteursspezifische Analyse der Interessen verschiedener Marktteilnehmer, aber auch der politischen oder gesellschaftlichen Entscheider. Dies beinhaltet das Zusammenspiel verschiedener gesellschaftswissenschaftlicher Disziplinen wie Soziologie, Psychologie, Geographie oder Verhaltensökonomie.
- Weiterhin untersucht sie das Zusammenspiel verschiedener politischer Ebenen (von der weltweiten Klimaschutzpolitik bis zur kommunalen Ebene).

### Kontakte

#### DLR

Prof. Dr. Carsten Agert  
Tel.: 0441/99906-100  
carsten.agert@dlr.de

Carsten Hoyer-Klick  
Tel.: 0711/6862-728  
carsten.hoyer-klick@dlr.de

Prof. Dr. André Thess  
Tel.: 0711/6862-358  
andre.thess@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Prof. Dr. Clemens Hoffmann  
Tel.: 0561/7294-345  
clemens.hoffmann@iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Gerhard Stryi-Hipp  
(Energiepolitik)  
Tel.: 0761/4588-5686  
gerhard.stryi-hipp@ise.fraunhofer.de

#### IZES

Eva Hauser  
Tel.: 0681/844 972-45  
hauser@izes.de

#### UFZ

Prof. Dr. Erik Gawel  
(Klima- und Energiepolitik)  
Tel. 0341/235-1940  
erik.gawel@ufz.de

Prof. Dr. Wolfgang Köck  
Tel.: 0341/235-1232  
wolfgang.koeck@ufz.de

Klaas Korte  
Tel.: 0341/235-1742  
klaas.korte@ufz.de

#### Wuppertal

Dr. Stefan Thomas  
(Energieeffizienz)  
Tel.: 0202/2492-143  
stefan.thomas@wupperinst.org

#### ZAE Bayern

Dr. Andreas Hauer  
Tel.: 089/329442-16  
andreas.hauer@zae-bayern.de

#### ZSW

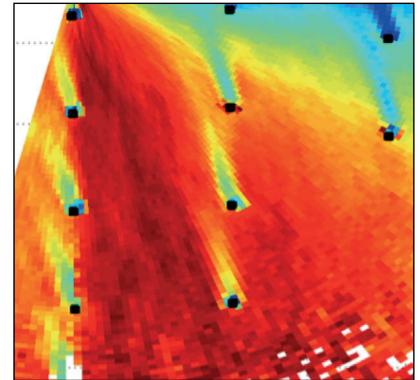
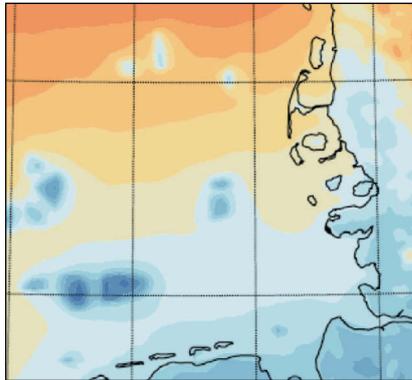
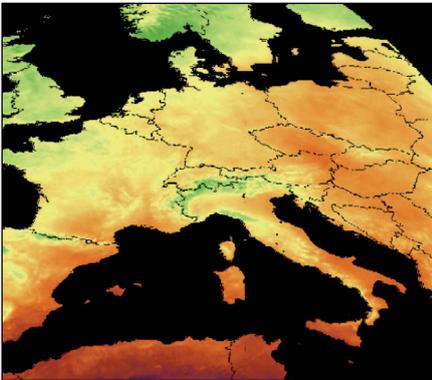
Maike Schmidt  
Tel.: 0711/7870-232  
maike.schmidt@zsw-bw.de

- Es wird erforscht, wie einzelne Gesetze und Förderinstrumente oder das Zusammenspiel unterschiedlicher politischer Regelungen das Handeln von Bürgern, Unternehmen und Institutionen beeinflussen.
- Entwicklung von Markteinführungs- und Marktdurchdringungsstrategien auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Ebenen und Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Politikberatung
- methodische Ansätze zur politiknahen Weiterentwicklung von Förderinstrumenten
- Es werden Kriterien für die Auswahl von Maßnahmen diskutiert, operationalisiert und angewendet.

In Zusammenarbeit mit der energierechtlichen Forschung werden Vorschläge gemacht, wie geltendes Recht an neue technologische, ökonomische oder gesellschaftliche Herausforderungen angepasst werden kann:

- Wie müssen energiepolitische Entscheidungen getroffen werden, damit sie als akzeptabel bewertet werden können?
- Wie kann die Abstimmung zwischen Bundesländern, Bund und EU-Ebene verbessert werden?
- Wie kann der Förderrahmen für erneuerbare Energien weiterentwickelt werden?
- Wie kann ein energiewendekonformer Regulierungsrahmen für den Stromnetzbereich ausgestaltet sein?
- Welche Anforderungen stellen die Interdependenzen zwischen Stromerzeugung, -transport und -verbrauch an die Ausgestaltung der Energiepolitik?
- Wie können Trade-offs zwischen den energiepolitischen Zielen adressiert werden?
- Wie kann eine genügsamere Nutzung von Energie (Energiesuffizienz) sozialverträglich gestaltet und gefördert werden?
- Wie können die Einsparvorgaben der Energieeffizienz-Richtlinie in Deutschland am besten erfüllt werden?
- Welche Instrumente können die energetische Sanierungsrate und -tiefe im Bestand steigern?
- Wie können Verkehrsvermeidung und -verlagerung künftig stärker genutzt werden?
- Wie lässt sich die Transformation des Wärmesektors stimulieren?
- Wie kann die gesellschafts- und verteilungspolitische Unterstützung für den Rückbau konventioneller Technologien gefördert werden?

## Energiemeteorologie



Wetter und Klima werden für die künftige Energieversorgung eine zunehmend wichtige Rolle spielen: Die wetterabhängigen erneuerbaren Energiequellen Wind und Sonne werden zentrale Säulen des künftigen Energiesystems.

Die energetische Nutzung von Biomasse ist ebenfalls wetter- und klimaabhängig.

Und letztlich erfordert auch der Betrieb konventioneller Energiesysteme meteorologische Expertise, z. B. bezüglich der Kühlung thermischer Kraftwerke, der Strombelastbarkeit von Freileitungen und der wetterabhängigen Verbrauchslast in Stromnetzen.

Diesen disziplinübergreifenden Anforderungen widmet sich die Energiemeteorologie als ein neues anwendungsorientiertes Arbeitsgebiet und Forschungsfeld, das sich an den Bedürfnissen einer gesicherten, nachhaltigen und kosteneffizienten Energieversorgung orientiert und gleichzeitig die dafür notwendige meteorologische Grundlagenforschung vorantreibt.

Angesichts der wachsenden Bedeutung von Wetter und Klima wird eine möglichst umfassende Beschreibung der Wechselwirkungen des gesamten Energieversorgungssystems mit den meteorologischen Randbedingungen immer wichtiger. Dies erfordert, spezifisch für Energiesysteme angepasste meteorologische Informationen bereitzustellen. Ermöglicht wird dies zum Beispiel durch die Entwicklung neuer Mess- und Vorhersagemethoden und neuer, integrierter Modelle.

Die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende verlangt präzise Informationen. Wenn beispielsweise Solar- und Windkraftwerke geplant werden, sind sehr genaue Kenntnisse über die lokal verfügbaren Ressourcen erforderlich, um die Eignung der Standorte beurteilen zu können.

Im laufenden Betrieb sind exakte Vorhersagen über die aktuelle Energieproduktion der Anlagen notwendig, um sie wirtschaftlich betreiben zu können. Und die Entwicklung kommender Generationen von Energiewandlern wie Solarzellen und Windenergieanlagen erfordert ebenfalls eine genaue Charakterisierung der relevanten meteorologischen Bedingungen.

### Datenquellen für die Energiemeteorologie

Links: Satelliten-Plattformen liefern Daten zur Bestimmung der Solarstrahlung am Erdboden.

Mitte: Numerische Wettermodelle beschreiben mesoskalige Windverhältnisse (d. h. auf einer räumlichen Skala von 2 bis 1000 km).

Rechts: LiDAR-Systeme vermessen kleinräumige Windströmungen in der Umgebung von Windparks.

© Grafiken DLR

### Forschungs- und Entwicklungsbedarf

- Entwicklung und Betrieb künftiger Energieversorgungssysteme benötigen spezifischere Methoden und präzisere Daten zur Verfügbarkeit von Wind und Solarstrahlung:
- Verbesserung von EE-Vorhersagen:
  - probabilistische Vorhersagen der EE-Erzeugung
  - Vorhersage von Extremereignissen
  - saisonale Vorhersagen
  - Integration in Steuerungsstrategien von Energiesystemen
- Analyse und Vorhersage der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Solar- und Windenergieerzeugung
- Integration der Interaktion von EE-Konvertern mit der Atmosphäre in meteorologische Modelle
- Entwicklung von EE-spezifischen meteorologischen Messmethoden
- verbesserte Wolken- und Aerosolinformation zur Solarstrahlungsbestimmung
- Kopplung von meteorologischen Modellen mit Energieversorgungs- und Nachhaltigkeitsmodellen
- EE-Erzeugungsmodelle für den Stadt- und Gebäudebereich
- lokale und regionale Klimabeeinflussung durch EE
- mögliche Folgen einer Klimaveränderung für die energetische Biomassenutzung
- Informations- und Kommunikationstechnik-Management energiemeteorologischer Daten (Digitalisierungs-Strategie)

### Kontakte

#### DLR

Dr. Detlev Heinemann  
Tel.: 0441/99906-115  
detlev.heinemann@dlr.de

#### Fraunhofer IEE

Dr. Reinhard Mackensen  
Tel.: 0561/7294-245  
reinhard.mackensen@iee.fraunhofer.de

#### Fraunhofer ISE

Dr. Elke Lorenz  
Tel.: 0761/4588-5015  
elke.lorenz@fraunhofer.ise.de

#### Fraunhofer IWES

Dr. Bernhard Lange  
Tel.: 0471/14290-350  
bernhard.lange@iwes.fraunhofer.de

#### KIT

Prof. Dr. Stefan Emeis  
Tel.: 08821/183-240  
stefan.emeis@kit.edu

## Direktorium und Geschäftsstelle

### Das Direktorium

Das Direktorium des FVEE besteht aus leitenden Vertretern der Mitgliedseinrichtungen.

Der Sprecher des Verbunds wird jährlich gewählt. Die Direktoren beraten über Arbeitsteilung, Zusammenarbeit und über die

Koordinierung gemeinsamer Forschungsprogramme und sind die Ansprechpartner für strategische Fragen.



#### DBFZ

Prof. Dr. Michael Nelles  
Wissenschaftlicher  
Geschäftsführer  
Tel.: 0341/2434-113  
michael.nelles@dbfz.de



#### Fraunhofer IWES

Prof. Dr. Andreas Reuter  
Institutsleiter Bremerhaven  
Tel.: 0471/902629-20  
andreas.reuter@iwes.fraunhofer.de



#### KIT

Prof. Dr. Holger Hanselka  
Präsident  
Tel.: 0721/608-22000  
holger.hanselka@kit.edu



#### DLR

Bernhard Milow  
Programmdirektor Energie  
Tel.: 02203/601-3655  
energie@dlr.de



#### GFZ

Prof. Dr. Ernst Huenges  
Leitung Reservoirtechnologien  
und ICGR  
Tel.: 0331/288-1440  
ernst.huenges@gfz-potsdam.de



#### KIT

Prof. Dr. Thomas Wetzel  
KIT-Zentrum Energie  
Tel.: 0721/608-46447  
thomas.wetzel@kit.edu



#### Forschungszentrum Jülich

Prof. Dr. Harald Bolt  
Mitglied des Vorstands  
Tel.: 02461/61-1808  
h.bolt@fz-juelich.de



#### HZB

Prof. Dr. Rutger Schlatmann  
Sprecher EE des HZB  
Tel.: 030/8062-15680  
rutger.schatmann@helmholtz-berlin.de



#### UFZ

Prof. Dr. Daniela Thraen  
Leiterin des Departments  
Bioenergie  
Tel.: 0341/2434-435  
daniela.thraen@ufz.de



#### Fraunhofer ISE

Prof. Dr. Hans-Martin Henning  
Institutsleiter  
Tel.: 0761/4588-5134  
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de



#### ISFH

Prof. Dr. Rolf Brendel  
Institutsleiter  
Tel.: 05151/999-403  
rolf.brendel@isfh.de



#### Wuppertal Institut

Prof. Dr. Manfred Fischeck  
Vizepräsident  
Tel.: 0202/2492-121  
manfred.fischeck@wupperinst.org



#### Fraunhofer ISE

Dr. Andreas Bett  
Institutsleiter  
Tel.: 0761/4588-5257  
andreas.bett@ise.fraunhofer.de



#### IZES gGmbH

Prof. Frank Baur  
Wissenschaftlicher Leiter  
Tel.: 0681/844 972-59  
baur@izes.de



#### ZAE Bayern

Prof. Dr. Vladimir Dyakonov  
Vorstand  
Tel.: 0931/70564-0  
vladimir.dyakonov@zae-bayern.de



#### Fraunhofer IEE

Prof. Dr. Clemens Hoffmann  
Institutsleiter Kassel  
Tel.: 0561/7294-345  
clemens.hoffmann@iee.fraunhofer.de



#### ZSW

Prof. Dr. Frithjof Staiß  
Geschäftsführendes  
Vorstandsmitglied  
Tel.: 0711/7870-210  
frithjof.staiss@zsw-bw.de

[www.fvee.de](http://www.fvee.de)

### Die Geschäftsstelle

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2  
10178 Berlin

Die Geschäftsstelle in Berlin ist das Informations- und Kommunikationszentrum des Verbunds.

Sie ist Ansprechpartner für Wissenschaft, Wirtschaft und Politik und betreibt die gemeinsame Öffentlichkeitsarbeit des Verbunds mit Tagungen, Workshops und Broschüren rund um die Forschung zu erneuerbaren Energien und Energieeffizienz.

Auf seinen Internetseiten bietet der FVEE allen Interessierten kostenfrei Informationen an:

- Informationen zu allen Forschungsthemen
- Downloads aller Publikationen des FVEE
- Pressemitteilungen
- Bildmaterial
- Informationen zu den Mitgliedsinstituten



#### Geschäftsführung

Dr. Niklas Martin  
Tel.: 030/288 7565-71  
oder 030/8062-17141  
fvee@helmholtz-berlin.de



#### Leitung Öffentlichkeitsarbeit

Petra Szczepanski  
Tel.: 030/288 7565-72  
oder 030/8062-17141  
fvee@helmholtz-berlin.de



#### Öffentlichkeitsarbeit

Franziska Wunschick  
Tel.: 030/288 7565-70  
oder 030/8062-17141  
fvee@helmholtz-berlin.de

## Mitgliedseinrichtungen und Ansprechpartner



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



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



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



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



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



**Fraunhofer IWES**  
Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme  
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  
Hamel/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  
Anja Matern: Tel. 0931/70564-352  
anja.matern@zae-bayern.de  
**Standort Würzburg**  
Magdalene-Schoch-Straße 3 • 97074 Würzburg  
**Standort Erlangen**  
Immerwahrstraße 2 • 91058 Erlangen  
**Standort Nürnberg**  
Fürther Straße 250 • 90429 Nürnberg  
**Standort Hof**  
Unterkotzauer Weg 25 • 95028 Hof



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



#### Förderung

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

- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
- BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
- BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

#### Herausgeber

ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE)  
Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 in 10178 Berlin  
Tel.: 030/2887565-71  
fvee@helmholtz-berlin.de  
www.fvee.de

#### Autorinnen und Autoren

sind die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Mitgliedseinrichtungen des FVEE

#### Redaktion und Koordination

Petra Szczepanski

#### Layout, Grafik

Hoch3 GmbH – Design- und Werbeagentur

#### Druck

Elbe Druckerei Wittenberg GmbH  
Gedruckt auf Circle Silk Premium White

Berlin, Oktober 2018





**FVEE** ForschungsVerbund  
Erneuerbare Energien  
Renewable Energy Research Association



**DBFZ**  
Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH



**DLR**  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.



**Forschungszentrum Jülich**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft



**Fraunhofer IEE**  
Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik



**Fraunhofer ISE**  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE



**Fraunhofer IWES**  
Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme



**GFZ**  
Helmholtz-Zentrum Potsdam  
Deutsches GeoForschungsZentrum



**HZB**  
Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie



**ISFH**  
Institut für Solarenergieforschung GmbH



**IZES gGmbH**  
Institut für Zukunftsenergie- und Stoffstromsysteme



**KIT**  
Karlsruher Institut für Technologie



**UFZ**  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH



**Wuppertal Institut**  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH



**ZAE Bayern**  
Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V.



**ZSW**  
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung  
Baden-Württemberg Gemeinnützige Stiftung