



## EXPERTENEMPFEHLUNGEN AUS DEN ARBEITSGRUPPEN FÜR DEN KONSULTATIONSPROZESS ZUM 7. ENERGIEFORSCHUNGSPROGRAMM

**Expertenempfehlungen aus den Arbeitsgruppen  
für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm**

# FORSCHUNGSNETZWERK FLEXIBLE ENERGIEUMWANDLUNG

## Einleitung

Transparenz und Partizipation sind wichtige Ziele der Bundesregierung im 6. Energieforschungsprogramm. Die sieben Forschungsnetzwerke Energie sind somit ein wichtiges Instrument der Energieforschungspolitik des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Sie tragen maßgeblich dazu bei, alle wesentlichen Akteure eines Themenschwerpunkts der Energieforschung zu vernetzen und an Strategieprozessen zu beteiligen. Dazu erarbeiten die Mitglieder der Forschungsnetzwerke Expertenempfehlungen zum künftigen Forschungsbedarf sowie zu möglichen Förderschwerpunkten und -formaten.

Im Dezember 2016 hat das BMWi als federführendes Ministerium für die Energiewende den Konsultationsprozess für ein neues Energieforschungsprogramm gestartet. Dieser Prozess bindet alle relevanten Akteure der Energieforschung und -wirtschaft frühzeitig in die Diskussion zur Weiterentwicklung der Energieforschungsförderpolitik ein und soll bis Ende 2017 abgeschlossen werden. Die Mitglieder des Forschungsnetzwerks Flexible Energieumwandlung haben konkrete Expertenempfehlungen für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm erarbeitet, die in dieser Broschüre vorgestellt werden.

## Themen des Forschungsnetzwerks

Durch die veränderten Aufgaben in der Energiewende stehen die konventionellen Kraftwerke vor einer Reihe neuer Herausforderungen. Sie müssen zu einem kosten- und ressourceneffizienten Teil- und Mindestlastbetrieb ertüchtigt werden. Dazu gehören

hohe An- und Abfahrgeschwindigkeiten, der Einsatz unterschiedlicher Brennstoffe und brennstoffflexible Verbrennungssysteme sowie geeignete Speicherlösungen. Darüber hinaus tragen in Deutschland entwickelte solarthermische Kraftwerke und Kraftwerkskomponenten weltweit zur CO<sub>2</sub>-Reduktion bei. Die fünf Arbeitsgruppen des Forschungsnetzwerks beschäftigen sich daher inhaltlich mit folgenden Schwerpunkten:

- AG 1** – Thermische Kraftwerke
- AG 2** – CO<sub>2</sub>-Technologien
- AG 3** – Solarthermische Kraftwerkstechnik, CSP
- AG 4** – Systemintegration, stoffliche und thermische Speicherung
- AG 5** – Turbomaschinen

In jeder Arbeitsgruppe wurden zwei AG-Leiter bzw. -Leiterinnen gewählt, die die Arbeit koordinieren und eine Schnittstellenfunktion zum Projektträger Jülich (PtJ) und zum BMWi innehaben.

## Gründung und Entwicklung des Forschungsnetzwerks

Um den Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der Kraftwerkstechniken zu eruieren, wurde am 24. Februar 2017 das Forschungsnetzwerk Flexible Energieumwandlung gegründet. Rund 150 Vertreterinnen und Vertreter aus Industrie, Politik und Forschungseinrichtungen nahmen an der Auftaktveranstaltung im BMWi in Berlin teil. Seitdem stößt das Netzwerk auf großes Interesse von Seiten der Industrie und Wissenschaft: Mittlerweile sind rund 340 Mitglieder registriert (Stand Oktober 2017).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Impressum

### Herausgeber

Projektträger Jülich (PtJ)  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
52425 Jülich

### Redaktion und verantwortlich für den Inhalt

Forschungsnetzwerk Flexible Energieumwandlung,  
Einleitung: Projektträger Jülich (PtJ)

### Gestaltung und Produktion

Projektträger Jülich (PtJ)  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
52425 Jülich

### Stand

Oktober 2017

Der Projektträger Jülich koordiniert die verschiedenen Aktivitäten, indem er unter anderem eine Geschäftsstelle in Berlin unterhält und Koordinatoren zur Verfügung stellt, die als erste Ansprechpartner für Mitglieder und Interessierte fungieren.

Das Netzwerk dient als Informations- und Diskussionsplattform für die forschungspolitischen Themen der konventionellen, aber auch der solarthermischen Kraftwerkstechniken sowie der CO<sub>2</sub>-Technologien. Um Synergien zu nutzen, wurde die bereits bestehende Forschungsinitiative Cooretec (CO<sub>2</sub>-Reduktions-Technologien), die in den Jahren zuvor ähnliche Ziele verfolgt hatte, in das neue Netzwerk integriert. COORETEC war 2004 ins Leben gerufen worden und Teil des 6. Energieforschungsprogramms „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ der Bundesregierung.

Rund vier Monate nach der erfolgreichen Auftaktveranstaltung fand am 30. Juni 2017 das erste Präsenztreffen des Netzwerks in Jülich statt. Um die Tätigkeit des Forschungsnetzwerks so effektiv wie möglich zu gestalten, wurden die fünf Arbeitsgruppen etabliert. Flache Hierarchien, ein Koordinierungskreis sowie netzwerkinterne und -übergreifende Treffen tragen seitdem zur konstruktiven Arbeit bei.

### Expertenempfehlungen für den Konsultationsprozess

Beim Jülicher Präsenztreffen im Sommer 2017 fiel gleichzeitig der Startschuss zur Mitarbeit am Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm. Innerhalb des laufenden Konsultationsprozesses nehmen die Forschungsnetzwerke eine wichtige Rolle ein, um den künftigen Forschungsförderbedarf eng an den Bedürfnissen von Wissenschaft und Industrie auszurichten. Die Arbeitsgruppen des Forschungsnetzwerks Flexible Energieumwandlung haben hierfür ihre Forschungsbedarfe in aussagekräftigen Themenblättern gebündelt.

Jede der fünf Arbeitsgruppen des Forschungsnetzwerks hat Forschungsziele erarbeitet, die dazu beitragen, dass das hohe Entwicklungspotenzial der konventionellen und solarthermischen Kraftwerkstechniken auch in anderen industriellen Bereiche in die Praxis gelangt. Unterteilt in Motivation, Forschungsinhalte, erwartete Ergebnisse sowie eine Beschreibung der dafür benötigten Art von Forschung sind die einzelnen Forschungsschwerpunkte übersichtlich strukturiert dargestellt. Die Netzwerkmitglieder möchten mit ihren Empfehlungen Impulse für die künftige Forschungsförderung im Bereich Energie geben.

## INHALT

<b>AG 1</b> <b>THERMISCHE KRAFTWERKE</b>	<b>2</b>
<b>AG 2</b> <b>CO<sub>2</sub>-TECHNOLOGIEN</b>	<b>8</b>
<b>AG 3</b> <b>SOLARTHERMISCHE KRAFTWERKSTECHNIK, CSP</b>	<b>12</b>
<b>AG 4</b> <b>SYSTEMINTEGRATION, STOFFLICHE UND THERMISCHE SPEICHERUNG</b>	<b>18</b>
<b>AG 5</b> <b>TURBOMASCHINEN</b>	<b>24</b>

# AG 1 THERMISCHE KRAFTWERKE

Thermische Kraftwerke sorgen für eine bedarfsgerechte Erzeugung von Strom und Wärme sowie verschiedene Systemdienstleistungen und spielen dabei eine entscheidende Rolle für die Versorgungssicherheit unseres Landes. Sie ergänzen flexibel die Stromeinspeisung aus Windkraft und Photovoltaik in windschwachen bzw. sonnenarmen Zeiten und bilden somit das Rückgrat der sogenannten Residuallast. Diese Aufgabe wird auch zukünftig von hoher Relevanz sein, jedoch werden sich die Anforderungen an thermische Kraftwerke im flexiblen Einsatz weiter verschärfen und die Einsatzzeiten durch den ambitionierten Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen deutlich reduzieren, was gleichzeitig den Wettbewerbsdruck auf Investitions- und Betriebskosten signifikant erhöht.

Großer Innovationsbedarf wird in neuen technischen Lösungen für hochautomatisierte, jederzeit abrufbare und zuverlässig verfügbare Stromerzeugungskapazität gesehen. Im globalen Kontext sind darüber hinaus Entwicklungsanstrengungen zur Flexibilisierung und Effizienzsteigerung sowie für den verbesserten Klima- und Umweltschutz erforderlich. Da Deutschland in vielen Kraftwerksbereichen, sowohl auf der industriellen als auch auf der wissenschaftlichen Seite, nach wie vor eine technologisch führende Position einnimmt, leisten entsprechende F&E-Ergebnisse aus der Verbundforschung zudem einen wichtigen Beitrag für den zukünftigen Exporterfolg und damit für die regional unterschiedlich ausgestalteten Energiewenden weltweit.

Unter thermischen Kraftwerken werden in diesem Zusammenhang vor allem Gaskraftwerke und Dampfkraftwerke verstanden, die mit festen, flüssigen und gasförmigen Brennstoffen befeuert werden und die freigesetzte thermische Energie schließlich in Nutzenergie wie Strom und Wärme umwandeln. Dazu gehören aber auch Anlagen auf Basis neuer Prozessvarianten und Hybridkonzepte (zum Beispiel für die Integration von Erneuerbaren und Speichern). Thematisch werden dabei Fragestellungen zentraler wie dezentraler Erzeugungsanlagen sowie deren Schnittstellen zu den Energienetzen adressiert und dafür auf Systemebene die Entwicklungsaktivitäten im Bereich

der Komponenten, wie zum Beispiel der Turbomaschinen und Gasmotoren, mit berücksichtigt. Auch wenn die eingesetzten Energieträger aktuell noch überwiegend aus fossilen Brennstoffen bestehen, lassen sich fortschrittliche thermische Kraftwerke langfristig auch mit erneuerbaren Brennstoffen (zum Beispiel aus Power-to-X-Prozessen) betreiben, sind also selbst unter strengen Klimaschutzvorgaben zukunftstauglich.

Die entwicklungsstechnischen Herausforderungen werden im Bereich thermischer Kraftwerke konkret bei den folgenden Schwerpunkten gesehen: Flexibilisierung, Effizienz und Verfügbarkeit, Versorgungssicherheit und Systemdienstleistungen, Brennstoffe und Emissionsminderung, Werkstoffe und Lebensdauer sowie Digitalisierung und Lebenszyklusoptimierung. Die Aufteilung der Themengruppen 1–1 bis 1–5 erfolgte entsprechend dieser Schwerpunktsetzung. Die nächsten Abschnitte gehen hierzu näher auf die Motivation, Forschungsinhalte, Ergebnisse und Art der Forschung ein.

## AG 1–1. Flexibilisierung, Effizienz und Verfügbarkeit

Steigerung von Betriebsflexibilität, Effizienz, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit bei zentralen und dezentralen Gas- und Dampfkraftwerken

Flexible konventionelle Kraftwerke stellen auf absehbare Zeit die einzige wirtschaftlich und in ausreichendem Umfang verfügbare Flexibilitäts- und Kapazitätsoption zur Absicherung zunehmender volatiler Stromeinspeisung aus erneuerbaren Quellen dar. Diese wichtige Aufgabe erfordert eine weitere Optimierung der Flexibilität und Effizienz der Anlagen.

### ■ MOTIVATION

Der weitere Ausbau der Erneuerbaren Energien wird in Deutschland und seinen Nachbarländern die Einsatzweise der konventionellen Kraftwerksflotte auf Basis von Kohle und Gas weiterhin deutlich verändern. Schnellere

## THEMEN | AG 1:

- AG 1–1. Flexibilisierung, Effizienz und Verfügbarkeit
- AG 1–2. Versorgungssicherheit und Systemdienstleistungen
- AG 1–3. Brennstoffe und Emissionsminderung
- AG 1–4. Werkstoffe und Lebensdauer
- AG 1–5. Digitalisierung und Lebenszyklusoptimierung

Lastwechsel, häufigeres An- und Abfahren, Betrieb bei tiefen Teillasten sowie längere Stillstandzeiten (zum Beispiel durch Saisonbetrieb) werden zunehmend notwendig sein. Dazu sind weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Optimierung auf Komponenten-, Prozess- und Anlagenebene und zur Gestaltung fortschrittlicher (Hybrid-)Systeme erforderlich. Trotz der Fokussierung auf Flexibilitätsaspekte ist im Hinblick auf Umweltschutz und Ressourcenschonung auch eine weitere Steigerung der Effizienz sowie von Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit in der Strom- und Wärmeenergieerzeugung zu berücksichtigen, wobei der Wirkungsgrad und die Emissionen im Teillastbereich der Anlagen an Bedeutung gewinnen. Unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit und Reduzierung der Stromerzeugungskosten sind Lösungen zu erarbeiten, die sowohl für die Nachrüstung von Bestandsanlagen als auch für Ersatzinvestitionen in konventionellen Kraftwerken zur Verfügung stehen.

### ■ FORSCHUNGSINHALTE

Vor diesem Hintergrund werden nachfolgende F&E-Schwerpunkte empfohlen:

- Verbesserung der wesentlichen Flexibilitäts- und Effizienzparameter Mindestlast, positive und negative Lastgradienten, An- und Abfahrzeiten, Wirkungsgrade und technisch-wirtschaftliche Optimierung des Gesamtsystems unter Marktgesichtspunkten
- Reduzierung der Mindestlast von kohlebefeuernden Dampferzeugern unter besonderer Berücksichtigung der Auswirkung auf Lebensdauer, Betriebssicherheit und nachgeschalteten Systemen zur Effizienzsteigerung und Emissionsminderung
- Verbesserung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Komponenten und Systemen
- Erarbeitung von Konzepten zur Integration von zusätzlichen Energiespeichern in den Kraftwerksprozess sowie zur Nutzung im Kraftwerk vorhandener Energiespeicher wie zum Beispiel Kaltkondensatenspeicher, Erweiterung Speisewasserbehälter

- Entwicklung von neuen Kreisprozessen und hybriden Anlagenkonzepten (zum Beispiel Integration von Gasturbinen, Gasmotoren und/oder Speichern an Erneuerbaren-Energien-Anlagen bzw. kohlebefeuernden Anlagen)
- Entwicklung von Systemen für den optimierten Einsatz und Betrieb von größeren Kollektiven aus zentralen und dezentralen Erzeugungseinheiten („virtuelle Kraftwerke“)
- Systeme zur Bereitstellung von Regelleistung

### ■ ERGEBNISSE

Das Ziel der Forschungsaktivitäten ist die Erarbeitung von fortschrittlichen Lösungen zur Erhöhung von Betriebsflexibilität, Effizienz und Leistungsfähigkeit, die wirtschaftlich und großtechnisch sowohl für die Nachrüstung von Bestandsanlagen als auch für die Realisierung von Neubauten eingesetzt werden können.

### ART DER FORSCHUNG

Bei den Aufgaben zur Flexibilisierung und Effizienzsteigerung handelt es sich um angewandte Forschung, die von der Methodenentwicklung, Modellbildung und Simulation über Testanlagen für Komponentenerprobung bis hin zur Realisierung von Pilot- und Demoanlagen reichen kann.

## AG 1–2. Versorgungssicherheit und Systemdienstleistungen

Kostenoptimierte Kraftwerkskonzepte zur Gewährleistung der Betriebssicherheit im Stromversorgungssystem.

Mit dem Wandel von einer regelbaren, größtenteils fossilen, hin zu einer fluktuierenden, auf regenerativen Energieträgern basierenden Stromerzeugungsstruktur, müssen möglichst kosteneffiziente Maßnahmen zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit und Aufrechterhaltung eines sicheren und störungsfreien Stromnetzbetriebs ergriffen werden.

## ■ MOTIVATION

Das Spannungsfeld zwischen einer volkswirtschaftlich kosteneffizienten Versorgungssicherheit und dem Erreichen der nationalen Klimaziele wird sich weiter verschärfen. Um beides sicherzustellen, müssen in absehbarer Zeit technische und ökonomische Anpassungen vorgenommen werden. Neben bestehenden zentralen Großkraftwerken wird der Fokus für den aufgezeigten Transformationsprozess auf dezentrale und modulare Kraftwerksanlagen mittlerer Leistungsklasse erweitert, mit dem Ziel, Versorgungssicherheit zu gewährleisten und die Folgekosten (Abregelung, Redispatch, Netzausbau) für die Übertragungsnetzbetreiber zu begrenzen.

## ■ FORSCHUNGSINHALTE

- Zukünftige Regelenergiebereitstellung  
Anhand techno-ökonomischer Studien und dynamischer Simulationsmodelle wird untersucht, welche Kraftwerkskonzepte im Kontext eines europäischen, emissionsarmen Stromversorgungssystems zukünftig die Bereitstellung von Regelenergie übernehmen können. Auf Basis einer Verifikation von bereits umgesetzten Maßnahmen am Regelenergiemarkt erfolgt gegebenenfalls eine Ausarbeitung von weitergehenden Vorschlägen für die Anpassung des Ausschreibungsverfahrens für Regelenergie.
- Flexible Spitzenlastabdeckung  
Das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) stärkt die Marktmechanismen und stellt explizit klar, dass der Strompreis das zentrale Investitionssignal bleibt. Für verschiedene Flexibilitätsoptionen, wie zum Beispiel den Umbau bzw. Retrofit von Bestandsanlagen und den Bau von flexiblen Neuanlagen, soll untersucht werden, inwieweit die geschaffenen Voraussetzungen einen Anreiz für Investitionen darstellen und nachhaltig einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen.
- Netz- und Kapazitätsreserve  
Im Hinblick auf den Rückgang gesicherter konventioneller Erzeugungskapazität sieht das EnWG zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit neben der Einführung einer Kapazitätsreserve auch die Weiterführung der sogenannten Netzreserve (Bewirtschaftung von Netzengpässen), sowie die Möglichkeit zur Errichtung von Netzstabilitätsanlagen vor. Verschiedene Anlagenkonzepte sollen

im Hinblick auf ihre technische und wirtschaftliche Eignung für diese Aufgaben untersucht und bewertet werden. Abschließend werden notwendige Kapazitäten für Netzstabilität als Netzreserve validiert.

## ■ ERGEBNISSE

Nach Abschluss der Arbeiten liegen Konzepte vor, mit denen in einem Stromversorgungssystem mit einem hohen Anteil aus regenerativen Energiequellen gewonnenen Stroms Regelleistung zur Verfügung gestellt wird und Kapazität in Form einer Kapazitätsreserve möglichst systemgerecht und volkswirtschaftlich kosteneffizient vorgehalten werden kann. Weiterhin werden wirtschaftliche Spitzenlastkonzepte benannt.

## ■ ART DER FORSCHUNG

Techno-ökonomische Evaluation, analytische Methoden und Simulation (Schnittstelle zwischen Anlagentechnik und Stromnetz)

### AG 1 – 3. Brennstoffe und Emissionsminderung

Charakterisierung, Aufbereitung und Einsatz von Brennstoffen, Emissionsminderung und Umweltschutz

Die Auswahl des Brennstoffs, dessen Aufbereitung und Verbrennung am Anfang der Prozesskette wie auch die Emissionsminderungsmaßnahmen während und nach der Verbrennung haben einen entscheidenden Einfluss auf den Anlagenbetrieb sowie die Klima- und Umweltbilanz thermischer Kraftwerke. Strengere Emissionsrichtlinien in Europa, aber auch weltweit, erfordern neue innovative Technologien und Verfahren, um Kohlendioxid- und Schadstoffemissionen weiter zu minimieren und somit eine möglichst saubere Residuallast zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit bereit zu stellen.

## ■ MOTIVATION

Für die Auswahl geeigneter, günstiger und verfügbarer Brennstoffe sind für einen störungsfreien Anlagenbetrieb mit geringstmöglichen Emissionen umfassende Brennstoffcharakterisierungen und die Kenntnis der brennstoffabhängigen Verschmutzung der Anlagen unter den jeweiligen Prozessbedingungen erforderlich. Dies gilt insbesondere bei der (Mit-)Verbrennung von CO<sub>2</sub>-neutralen Energierohstoffen oder -reststoffen. Des Weiteren sind für Kraftwerke verschärfte Emissionsgrenzwerte (zum

Beispiel für Quecksilber und Stickoxide) zu erwarten, so dass entsprechende verfahrenstechnische Maßnahmen und Anlagenmodifikationen zur Einhaltung dieser Grenzwerte getroffen werden müssen

## ■ FORSCHUNGSINHALTE

Vor diesem Hintergrund ist die Befassung mit den nachfolgenden F&E-Schwerpunkten erforderlich:

- Einfluss des Einsatzes von verschiedenen Brennstoffen auf den Anlagenbetrieb (Effizienz, Verschmutzung, Korrosion, Emissionen) einschließlich einer entsprechenden Prozessoptimierung (siehe auch Abschnitt AG 1–1. Flexibilisierung, Effizienz und Verfügbarkeit)
- Aufbereitung von Biomasse, Abfällen und Ersatzbrennstoffen für die (Mit-)Verbrennung in Dampfkraftwerken und Müllverbrennungsanlagen
- Vermeidung von Korrosion und Verschmutzung beim Einsatz von Sekundärbrennstoffen in Dampfkraftwerken
- Sichere und emissionsarme Verbrennung von Wasserstoff und anderen synthetischen Brennstoffen (Biokraftstoffe) in Gaskraftwerken
- Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Limitierung der Emissionen (insbesondere Quecksilber, Stickoxid) von Kraftwerken unterhalb der zu erwartenden Grenzwerte
- Entwicklung von Online-Messtechnik für die Automatisierung von Kraftwerksfeuerungen im Hinblick auf eine optimierte Betriebsweise unter Einhaltung von Emissionsgrenzwerten

## ERGEBNISSE

Das Ziel der Forschungsaktivitäten ist es, Daten von Brennstoffen im Hinblick auf deren Einsatz in Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen, Erkenntnisse zu den Auswirkungen der Brennstoffe auf den Betrieb und die Emissionen, Methoden zur verlässlichen Messung von Emissionen, Modelle zur Vorhersage des Betriebsverhaltens und der Emissionen von Feuerungen sowie Handlungsempfehlungen für Kraftwerksbetreiber hinsichtlich des optimierten Einsatzes von Brennstoffen und der Vermeidung von Emissionen zu gewinnen und etwaige erforderliche Technologien bzw. Verfahren zu entwickeln und erproben.

## ■ ART DER FORSCHUNG

Bei den Forschungs- und Entwicklungsaufgaben geht es vor allem um Brennstoffanalysen, Versuche in Labor- und Pilot-/Demonstrationsanlagen, Modellbildung und Simulation sowie um Messkampagnen in Kraftwerken.

### AG 1 – 4. Werkstoffe und Lebensdauer

Nutzung verbesserter Werkstoffe und fortschrittlicher Lebensdauermodelle für zukünftige Einsatzfelder

Verbesserte Werkstoffe und fortschrittliche Lebensdauermodelle leisten einen entscheidenden Beitrag, um konventionelle Kraftwerke an die sich weiter ändernden Betriebsweisen – die insbesondere von häufigen und schnellen Laständerungen sowie An- und Abfahrten geprägt sind – anzupassen.

## MOTIVATION

Mit dem Ausbau der Nutzung der erneuerbaren Energien und dem damit verbundenen Zuwachs an fluktuierender Stromeinspeisung wird sich der Einsatz von konventionellen Kohle- und Gaskraftwerken weiter deutlich ändern. Schnelle Lastwechsel, häufige An- und Abfahrten sowie der Betrieb bei Teillast und entsprechende Leistungswechsel der Kraftwerke werden zunehmend notwendig sein. Durch diese Fahrweise werden einzelne Komponenten der Kraftwerke immer stärker belastet. Diese Herausforderung kann zum einen durch die Entwicklung und den Einsatz verbesserter Werkstoffe adressiert werden, welche anders als bisher verbaute Werkstoffe auf das spezifische Beanspruchungsprofil zu optimieren und zu charakterisieren sind. Darüber hinaus sind fortschrittliche präzise und robuste Lebensdauermodelle erforderlich, um die Auswirkungen der zunehmend dynamischen Belastung zu beschreiben und so den effizienten und sicheren Einsatz von Werkstoffen zu ermöglichen und letztendlich die Anlagenverfügbarkeit zu optimieren und Stillstandzeiten zu minimieren.

## ■ FORSCHUNGSINHALTE

Vor diesem Hintergrund ist die Befassung mit den nachfolgenden F&E-Schwerpunkten erforderlich:

- Entwicklung, Charakterisierung und Qualifizierung von neuen Legierungen (ermüdungs- und langzeitstabil sowie fehlertolerant), funktionalen Werkstoffsystemen (Verbundwerkstoffe, Schutzschichten),

additiver Fertigung und Schweißverfahren für den Einsatz in Kraftwerken

- Experimentelle Untersuchung von Komponenten und Werkstoffen unter realen Betriebsbedingungen
- Entwicklung fortschrittlicher Messverfahren und Sensoren zur Ermittlung der Belastung von Komponenten im Betrieb
- Entwicklung fortschrittlicher und robuster Lebensdauermodelle (akkumulativ, konstitutiv, mechanismenbasiert) einschließlich ihrer Validierung und praktische Implementierung als Anwenderprogramm sowie im Rahmen von zu erarbeitenden erweiterten Regelwerken und Richtlinien
- Zustandsbewertung und Restlebensdauerbestimmung von potentiell kritischen Komponenten mit Hilfe fortschrittlicher Lebensdauermodellbildung (Probabilistik, Meta-Modellierung) und unter Berücksichtigung von Flottendaten (Big-Data)
- Untersuchung wasser-/dampfseitiger sowie rauchgasseitiger Korrosionsphänomene und Entwicklung von Maßnahmen, um diesen zu begegnen
- Entwicklung von werkstoffseitigen Optionen zur Reduzierung der Verschmutzung/Korrosion an den Oberflächen von Heizflächen

#### ■ ERGEBNISSE

Das Ziel der Forschungsaktivitäten ist es, für die genannten Themen im Bereich der Werkstoffe und Lebensdauerbetrachtungen die Entwicklungen so weit voranzutreiben, dass auf Basis der Ergebnisse der Einsatz in Kraftwerken realisiert werden kann. Dazu müssen die Aktivitäten so weit entwickelt werden, dass sie die notwendige Absicherung für den realen Einsatz mit einschließt. Das bedeutet, dass im Endergebnis zum Beispiel Werkstoffe, Sensoren oder IT-gestützte Berechnungsmodelle für den Einsatz im Kraftwerk vorbereitet sind. Mit diesen Ergebnissen wird es dann möglich sein, konventionelle Kraftwerke präziser und zustandsorientiert an zukünftige Betriebsweisen anzupassen.

#### ■ ART DER FORSCHUNG

Bei den Forschungs- und Entwicklungsaufgaben geht es vor allem um Labor- und Feldversuche, Testanlagen für Komponentenerprobung unter realen Bedingungen,

Untersuchungen an Werkstoffen und Bauteilen mit Betriebseinsatzzeiten, theoretische Untersuchungen, Methodenentwicklung, Modellbildung und Simulation.

### AG 1 – 5. Digitalisierung und Lebenszyklus-optimierung

Neue Möglichkeiten für Kraftwerke durch Digitalisierung und Lebenszyklusoptimierung

Die Digitalisierung verändert unser Leben in fundamentaler Art und Weise, insbesondere erschließt sie neue Potenziale zur Vernetzung, Verbesserung und Optimierung im industriellen Sektor, auch Industrie 4.0 genannt, indem sie physikalische Prozesse mit der digitalen Welt vereint. Im Bereich der flexiblen Energieumwandlung ist sie ebenfalls von herausragender Bedeutung für den zukünftigen Einsatz thermischer Kraftwerke und damit für die Sicherheit der Energieversorgung und Bezahlbarkeit der Energiewende.

#### ■ MOTIVATION

Die erforderliche hochflexible Fahrweise bei reduzierten Einsatzzeiten der auch langfristig für die Bereitstellung von Residuallast benötigten thermischen Kraftwerke führt zu stärkeren Belastungen von Komponenten und Materialien sowie insgesamt zu höheren Anforderungen an die Automatisierung und präzisere Vorhersagen. Durch vollständige digitale Kopien der realen Anlagen können die Prozessgüte überwacht, die Fahrweise und Wartung über den gesamten Lebenszyklus besser optimiert und Kosten gesenkt werden. Die über fortschrittliche Datenerfassung und -analyse verfügbaren Erfahrungen lassen sich sogar auf ganze Flotten ausdehnen. Digital integrierte Auslegungs- und Herstellungsprozesse erlauben außerdem, zum Beispiel durch additive Fertigung, neuartige Strukturen von Bauteilen mit verbesserten Eigenschaften bis hin zur komplett virtualisierten Planung ganzer Anlagen. Weitere Herausforderungen bestehen im Schutz vor digitalen Angriffen zur Anlagensicherheit.

#### ■ FORSCHUNGSINHALTE

Vor diesem Hintergrund ist die Befassung mit den nachfolgenden F&E-Schwerpunkten erforderlich:

- Intelligente Sensorik für Kraftwerke, Datenübertragung und -validierung, Verknüpfung und komplexe Auswertung großer Datenmengen unterschiedlicher Strukturen aus verschiedenen Datensystemen

- „CAR – Computer Aided Reliability“ innerhalb der Lebensdauerbewertungskette: Digitale Materialdatenaufbereitung, probabilistische Beschreibungen, robuste Anwenderprogrammentwicklung, Etablierung von numerisch gestützten Ansätzen innerhalb von Regelwerken und Richtlinien
- Betriebsoptimierung sowie verbesserte zustandsbasierte und vorausschauende Wartung über den Lebenszyklus der Kraftwerke durch Digitalisierung: Virtueller Zwilling, On-Site-Anlagensimulation, Betriebsdatenanalyse und Prozessgüteüberwachung, Machine-Learning-Algorithmen
- Betriebskonzepte für reduzierte Einsatzzeiten unter Nutzung neuer Möglichkeiten der elektrischen Antriebstechnik, Automatisierung, Virtualisierung und multimodalen Interaktion in Mensch-Maschine-Systemen
- Neue Bauteilstrukturen und Auslegungsmöglichkeiten durch additive Herstellungsverfahren und digitale Fertigungsprozesse
- IT-Sicherheit für thermische Kraftwerke

#### ■ ERGEBNISSE

Ziel der Forschungsaktivitäten ist es, innovative Lösungen zur Digitalisierung für den Einsatz in thermischen Kraftwerken zu entwickeln, um diese digital „fit“ für die kommenden Herausforderungen der Energiewende machen zu können. Dazu stehen Ergebnisse aus F&E-Projekten zu neuartiger Sensorik und Datenanalyse, zustandsbasierter und vorausschauender Wartung, fortschrittlicher Modellierung und Simulation, integrierten Fertigungsprozessen, robusten IT-Sicherheitskonzepten und lernenden Verfahren zur Maschinensteuerung und Betriebsoptimierung zur Verfügung.

#### ■ ART DER FORSCHUNG

Bei den Aufgaben zur Digitalisierung und Lebenszyklusoptimierung handelt es sich überwiegend um angewandte und interdisziplinäre Forschung, welche neben den klassischen Ingenieurwissenschaften die Informatik sowie die Mathematik mit einbeziehen. Für vielversprechende Ansätze sind im Anschluss auch geeignete Pilotprojekte und Demonstrationen erforderlich, um digitale Lösungen im realen Umfeld zu validieren.



# AG 2 CO<sub>2</sub>-TECHNOLOGIEN

Die Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen ist ein zentrales Ziel der Energiepolitik. Neben der grundsätzlichen Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen sind technische Lösungen erforderlich, um dieses Ziel zu realisieren.

Dies kann teilweise durch die Modifizierung der erforderlichen technischen Prozesse erfolgen. Allerdings lassen sich CO<sub>2</sub>-Emissionen bei einigen Produktionsprozessen (zum Beispiel Stahl, Zement etc.) bislang kaum oder gar nicht vermeiden. Für die großtechnische Stromerzeugung in Kraftwerken hingegen existieren technische Lösungen, um CO<sub>2</sub> aus den Prozessen abzuscheiden. Dies konnte in Demonstrationsanlagen in jüngerer Vergangenheit erfolgreich gezeigt werden. Diese Technologien sind weiter zu entwickeln und auf andere Bereiche zu übertragen.

CO<sub>2</sub> kann und wird auch schon als Arbeitsmedium in unterschiedlichen Prozessen (zum Beispiel Kühlaggregaten) genutzt. In alternativen Kraftwerksprozessen kann CO<sub>2</sub> in superkritischem Zustand als Arbeitsmedium genutzt werden und ermöglicht deutlich kompaktere Anlagen. Auf diesen dynamisch wachsenden Technologiefeldern sind die deutsche Industrie und Forschungsgemeinschaft derzeit keine Innovationsführer, haben aber großes Potenzial, zu relevanten Mitgestaltern in diesem Technologiefeld zu werden. Dazu ist bestehende Hochtechnologie zu adaptieren und entsprechend weiterzuentwickeln.

Neben der Möglichkeit, CO<sub>2</sub> als Arbeitsmedium zu nutzen, lässt sich CO<sub>2</sub> auch zu Kraft- und Brennstoffen oder Chemikalien weiterverarbeiten. Dies ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn dazu nachhaltig erzeugter Wasserstoff und weitere, nachhaltig erzeugte Stoffe in den notwendigen Umwandlungsprozessen genutzt werden können. Somit lässt sich langfristig der Bedarf an fossilen Rohstoffen wie Öl, Gas oder Kohle stark reduzieren. Durch die Nutzung von CO<sub>2</sub> als „Rohstoff“ ergeben sich Möglichkeiten, durch Zwischenspeicherung von CO<sub>2</sub> Energie zu speichern. Viele der dazu notwendigen Prozessschritte und Technologien sind schon seit langer Zeit verfügbar. Diese müssen allerdings an die neuen Anforderungen angepasst werden, die aus der angestrebten Dekarbonisierung der Energieversorgung resultieren.

Für abgetrenntes CO<sub>2</sub>, das nicht als „Rohstoff“ weiterverwertet werden kann und dauerhaft gespeichert werden soll, sind entsprechende Infrastrukturen zu entwickeln und aufzubauen. Die bisherigen Forschungen und Analysen auf diesem Gebiet haben den Bedarf von Großkraftwerken berücksichtigt, die zur Stromerzeugung genutzt werden. Im sich wandelnden Energiemarkt der Zukunft entstehen andere Anforderungen an die dauerhafte und vorübergehende Speicherung von CO<sub>2</sub>. Es gilt, dezentrale Speicher- bzw. Zwischenspeicheroptionen zu entwickeln und zu analysieren. Vor allem für große industrielle CO<sub>2</sub>-Emittenten kann es sinnvoll sein, unterschiedliche Systeme nutzen zu können. Bei der direkten Speicherung in unterirdischen Lagerstätten wird eine nachhaltige Nutzung von Böden und Ressourcen entscheidend, um zusätzliche Umweltprobleme zu vermeiden.

Die notwendigen Forschungsarbeiten zu den genannten Themen sind in enger Kooperation von Wissenschaft und Industrie durchzuführen, sodass deutsche Unternehmen und Forschungsstellen eine Vorreiterrolle bei CO<sub>2</sub>-Technologien einnehmen können.

## AG 2 – 1. CO<sub>2</sub>-Abscheidung

### ■ MOTIVATION

Die Energiebereitstellung durch Verbrennungsprozesse verursacht den weitaus größten Teil der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Stromerzeugung (zum Beispiel durch Kraftwerke, BHKW etc.) hat dabei den größten Anteil, aber auch Produktionsprozesse in der Industrie (zum Beispiel Stahlproduktion, Grundstoffe etc.) setzen große CO<sub>2</sub>-Mengen frei, die teilweise prozessbedingt nicht durch erneuerbare Energien substituiert werden können.

Da grundlegende CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien bisher vor allem für Kraftwerke entwickelt wurden, sollten die jeweils aussichtsreichsten zukünftig auf die genannten Bereiche übertragen werden.

## THEMEN | AG 2

AG 2 – 1. CO<sub>2</sub>-Abscheidung

AG 2 – 2. CO<sub>2</sub>-Anwendungen sowie Transport und Umgang mit CO<sub>2</sub>

AG 2 – 3. Chemische Nutzung von CO<sub>2</sub>

AG 2 – 4. CO<sub>2</sub>-Injektion und unterirdische CO<sub>2</sub>-Speicherung

### ■ FORSCHUNGSINHALTE

- Anpassung und Skalierung von Abscheideanlagen für industrielle Quellen (zum Beispiel BHKW bzw. stationäre Motoren und Turbinen, Produktionsprozesse in der Industrie etc.)
  - Weiterentwicklung der bekannten Abscheidetechniken hinsichtlich der Senkung des Eigenenergiebedarfs, der Investitions- und Betriebskosten
  - Vergleichende Betrachtung (Ökonomie, Umweltauswirkungen) der etablierten Abscheidetechnologien für industrielle Emittenten
  - Entwicklung neuartiger Abscheidetechnologien für industrielle Emittenten unter Einbeziehung der jeweiligen energetischen und stofflichen Ressourcennutzung
  - Betriebskonzepte zur Flexibilisierung der CO<sub>2</sub>-Abscheidung
  - Charakterisierung der erforderlichen Kennwerte für abgeschiedene CO<sub>2</sub>-Ströme in Abhängigkeit der zukünftigen Verwendung von CO<sub>2</sub>
  - Realisierung von Demonstrationsanlagen im technisch relevanten Maßstab (je nach Branche)
  - Umfassende Bewertung der ökonomischen Aspekte und der Umweltauswirkungen
- ### ■ ERGEBNISSE
- Skalierbare technologische Prozesse zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung in Industrieprozessen
  - Wirtschaftliche Konzepte zur branchenspezifischen CO<sub>2</sub>-Abscheidung in Abhängigkeit von politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen
- ### ■ ART DER FORSCHUNG

Die Forschung erstreckt sich von der Grundlagenforschung über Systembetrachtungen bis hin zur

anwendungsnahen Forschung (Demonstrationsanlagen), wobei letztere eine angemessene Industriebeteiligung erfordert.

## AG 2 – 2. CO<sub>2</sub>-Anwendungen sowie Transport und Umgang mit CO<sub>2</sub>

### ■ MOTIVATION

CO<sub>2</sub> bietet als Arbeitsmedium einige Vorteile, zum Beispiel als superkritisches CO<sub>2</sub> in alternativen Kraftwerks- bzw. Organic Rankine Cycle- (ORC-) Prozessen sowie in Kühlaggregaten und Klimaanlage. Dieses dynamisch wachsende Technologiefeld bietet Potenzial zu deutlich kompakteren Anlagengrößen mit hoher Flexibilität. Einsetzbar in verschiedenen Anwendungsfeldern sollen technologische und wirtschaftliche Anforderungen erarbeitet werden.

### ■ FORSCHUNGSINHALTE

- Umgang mit CO<sub>2</sub> hinsichtlich Korrosion → Werkstoff-Entwicklungen für relevante Druck- und Temperaturbereiche
- Erarbeitung der Anforderungen für die Entwicklung/Anpassung von notwendigen Turbomaschinen/Pumpen und deren Komponenten
- Entwicklung und Analyse von Wärme-Kreisläufen für potenzielle Anwendungsbereiche wie zum Beispiel CSP (Concentrated Solar Power) und WHR (Waste Heat Recovery) → Schnittstellen zu AG 1 und AG 3
- CO<sub>2</sub> als Wärmeträgermedium in Erdwärmesonden und geothermischen Anwendungen
- Entwicklung von CO<sub>2</sub>-Zwischenspeichern zur Flexibilisierung
- Aufbereitung von CO<sub>2</sub>-Strukturen
- Auswirkungen auf die Umwelt



## ■ ERGEBNISSE

- Ökonomisch und technologisch umsetzbare Wärme-Kreisläufe
- Betriebskonzepte und Flexibilität von CO<sub>2</sub>-Infrastrukturen
- Werkstoffvorschläge für unterschiedliche Einsatzbereiche

## ■ ART DER FORSCHUNG

Entwicklung von Methoden (Produkten und Prozessen) und ggf. Anwendungen in Pilot- und Demoprojekten durch enge Kooperationen von Wissenschaft und Industrie.

### AG 2 – 3. Chemische Nutzung von CO<sub>2</sub>

## ■ MOTIVATION

Nachhaltig erzeugter H<sub>2</sub> oder andere Stoffe können abgetrenntes CO<sub>2</sub> zu Kraft- und Brennstoffen oder zu Grundchemikalien umsetzen. Dadurch kann der Bedarf an fossilen kohlenstoffhaltigen Rohstoffen (Kohle, Gas, Öl) perspektivisch gesenkt werden. Diese Umwandlungsmöglichkeiten eröffnen prinzipiell Möglichkeiten, über CO<sub>2</sub> eine Pufferung bzw. Speicherung von Energie vorzunehmen. Diese Verfahren und die notwendigen Technologien sollen weiterentwickelt und zur großtechnischen Einsatzreife geführt werden.

## ■ FORSCHUNGSINHALTE

- Flexible Power-to-X-Prozesse mit Schwerpunkt auf Synthese- und Katalysatoren-Entwicklungen
- Direkte elektrochemische CO<sub>2</sub>-Umsetzungen zu C-haltigen, nutzbaren Stoffen
- Gasprozess-Konditionierung („Feedgas“)
- Energieeffiziente Verdichtung von CO<sub>2</sub> (z. B. elektrochemische Kompression, hocheffiziente Kompressoren)
- Senkung des Eigenenergiebedarfs, der Investitions- und Betriebskosten der etablierten Verfahren unter Einbeziehung der branchenspezifischen Anforderungen
- Realisierung von Demonstrationsanlagen im technisch relevanten Maßstab

- Umfassende Bewertung der ökonomischen Aspekte und der Umweltauswirkungen

## ■ ERGEBNISSE

- Robuste Verfahren mit hoher Flexibilität zur Umwandlung von CO<sub>2</sub> in Treibstoffe und Grundchemikalien
- Neuartige Katalysatoren, Verfahren, chemische Energiespeicher
- Demonstration einer CCU-Kette
- Handlungsvorschläge für die Politik

## ■ ART DER FORSCHUNG

Wissenschaftliche Projektforschung mit Monitoring und Implementierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen in Kooperation mit der Industrie.

### AG 2 – 4. CO<sub>2</sub>-Injektion und unterirdische CO<sub>2</sub>-Speicherung

## ■ MOTIVATION

Voraussetzung für eine CCS- und CCUS-Infrastruktur ist die dauerhafte bzw. vorübergehende Speicherung von CO<sub>2</sub>. Bisher betrachtete Speicheroptionen berücksichtigten den Speicherbedarf von Großkraftwerken an Standorten auf dem Festland. Dezentrale kleinere Zwischenspeicher oder dauerhafte Speicher für industrielle Emittenten könnten alternative Speicheroptionen nutzen. Bündelung und Transport von CO<sub>2</sub> aus unterschiedlichen Quellen zur Speicherung unterhalb des Meeresbodens ist eine derzeit propagierte Option. Derzeit liegen noch keine geo- und sicherheitstechnischen Anforderungen vor. Bei der Nutzung von Biomasse für CCS oder der direkten Speicherung von Kohlenstoff in Böden ist die nachhaltige Nutzung von Böden und Ressourcen entscheidend, um transmediale Problemverlagerungen oder zusätzliche Umweltprobleme zu vermeiden. Umfassende und vergleichende Ökobilanzen sind für diese Klimaschutzoptionen noch nicht vorhanden.

## ■ FORSCHUNGSINHALTE

- Stoffstrom-Analysen

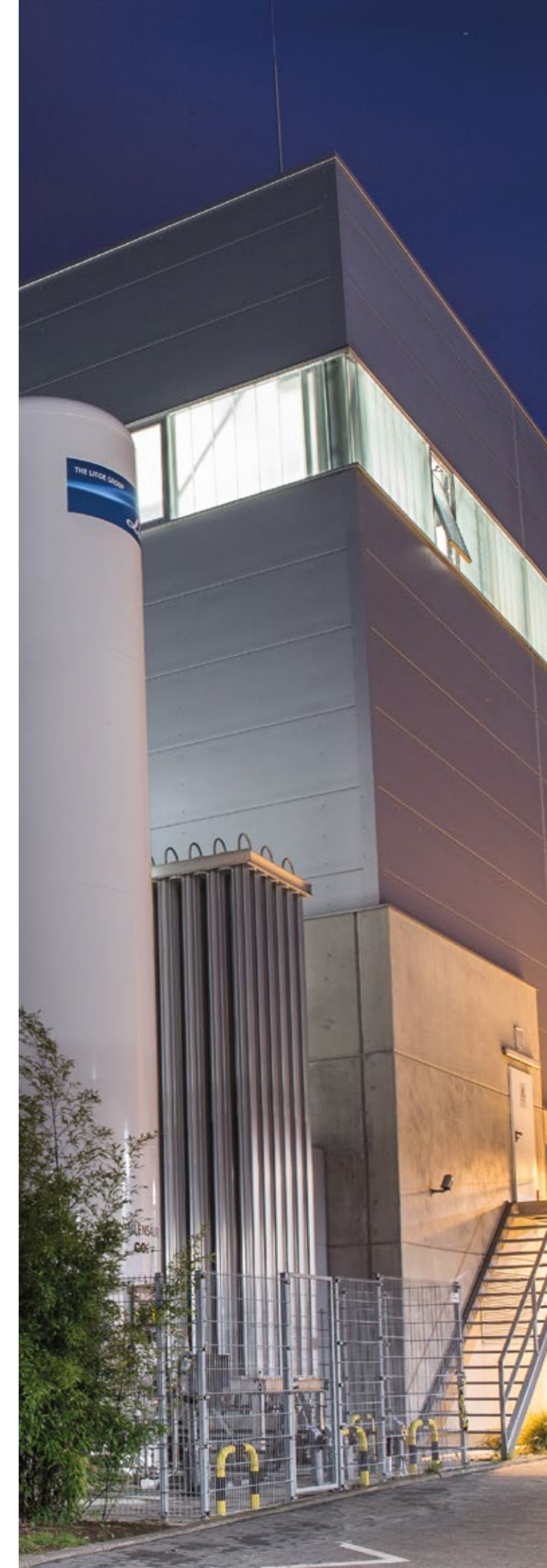
- Aufbau und Verwendung von unterirdischen Pufferspeichern
- Anforderungen an kleine dezentrale Speicher und alternative Speicherkonzepte (in Formationswässern gelöstes CO<sub>2</sub>, kapillare Bindung in offenen Aquiferen)
- Anforderungen an die Speichersicherheit, insbesondere unverfestigte Gesteine in Deckgebirgen und Störungen
- Detektion und Nachweisgrenzen für CO<sub>2</sub> unter realen Umweltbedingungen (Pilot- und Demonstrationsprojekte)
- Erfassung der Eingangsgrößen für umfassende Ökobilanzen zu CCS- und Bio-CCS-Konzepten

## ERGEBNISSE

- Kriterien zur Standortuntersuchung, -bewertung und -auswahl, sowie Potenziale von Speichern für industrielle Emissionen aufzeigen
- Anforderungen an CO<sub>2</sub>-Ströme und CCS/CCUS-Netze

## ■ ART DER FORSCHUNG

Die dafür notwendigen Forschungsarbeiten sind eher im Bereich der Grundlagenforschung angesiedelt, denn praktische Erfahrungen aus großen industriellen Demonstrationsprojekten gibt es kaum in Europa, daher sind ggf. internationale Kooperationen (z. B. im Rahmen von EU ACT oder Mission Innovation) anzustreben.



# AG 3 SOLARTHERMISCHE KRAFTWERKE, CSP

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

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

Hier bieten solarthermische Kraftwerke eine Lösung: Durch ihre großen thermischen Speicher und die resultierende Planbarkeit der Einspeisung – im Gegensatz zur nicht planbaren, volatilen Einspeisung der aktuell meistgenutzten Technologien PV und Windkraft – können sie nicht nur die Rolle von Grundlast-, sondern auch von flexiblen Mittel- und Spitzenlastkraftwerken spielen.

Die Stromgestehungskosten solarthermischer Kraftwerke für planbare elektrische Energie sanken in den letzten Jahren bereits deutlich von rund 30 €-Cent je Kilowattstunde auf heute etwa 6 €-Cent – unter günstigen Einstrahlungs- und Finanzierungsbedingungen. Unter solchen Bedingungen erlauben sie in Verbindung mit PV-Kraftwerken eine Rund-um-die-Uhr-Versorgung, die bereits wettbewerbsfähig mit der Stromerzeugung aus Erdgaskraftwerken ist. Gleichzeitig vermeiden sie die Volatilitätsrisiken in Bezug auf den Brennstoffpreis sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen und bieten ein erhebliches lokales Wertschöpfungspotenzial in den Zielmärkten.

Kostengünstige, flexible solarthermische Kraftwerke erlauben es daher, den Anteil erneuerbarer Energien mit fluktuierender Erzeugung weiter zu steigern und damit die globalen Klimaschutzziele zu erreichen. Darüber hinaus bieten Planung, Bau und Betrieb solcher Kraftwerke auch interessante Geschäftsmöglichkeiten für deutsche Unternehmen.

An weiteren deutlichen Kostensenkungen muss jedoch auch zukünftig gearbeitet werden, um die noch sehr schmale Marktbasis von einigen hundert Megawatt pro Jahr signifikant zu verbreitern, ebenso an der „Flexibilisierung“ des Kraftwerksteils, um die gestiegenen Anforderungen hinsichtlich kurzer Anfahrzeiten und großer Lastgradienten zu erfüllen. Die Integration anderer erneuerbarer Technologien, die Nutzung von Methoden und Werkzeugen aus der Digitalisierung zur Optimierung von Planung, Betrieb und Wartung sowie die Vorbereitung von Standards sind weitere wichtige Ansatzpunkte, die im Folgenden näher erläutert werden.

## THEMEN | AG 3:

AG 3 – 1. Integration und Speicherung

AG 3 – 2. Techno-ökonomische Effizienzsteigerung

AG 3 – 3. CSP 4.0

AG 3 – 4. Vorbereitung von Standards für Solarthermische Kraftwerke

### AG 3 – 1. Integration und Speicherung

Integrationskonzepte für Solarthermische Kraftwerke und Wärmespeicher im Verbund mit anderen erneuerbaren Energien mit dem Ziel einer bedarfsgerechten Bereitstellung von Strom und/oder Wärme

#### ■ MOTIVATION

Solarthermische Kraftwerke mit integriertem thermischem Speicher ermöglichen eine bedarfsorientierte solare Stromerzeugung. Damit bieten sie das Potenzial, den Anteil an erneuerbaren Energien an der Gesamtversorgung deutlich auszubauen. Sie können auch dann Strom produzieren, wenn Photovoltaik und Windenergie aufgrund der momentanen Wetterlage diesen nicht liefern können. Es ist daher wichtig, integrierte Systeme zu entwickeln, die solare Energie nach Bedarf erzeugen. Diese Integration kann mit solarthermischen Kraftwerken (CSP) nicht nur über die Kopplung über das Stromnetz, sondern auch im Sinne einer tatsächlichen Integration innerhalb des Kraftwerkes realisiert werden. Batterien als elektrische Speicher sind in der Markteinführung, bieten derzeit aber keine wirtschaftliche Alternative für die Bereitstellung hoher Leistung über mehrere Stunden. Bei solarthermischen Kraftwerken ist mit einfachen Maßnahmen eine Erweiterung mit Biomasse/Abfallstoffen gefeuerten Dampferzeugern möglich, die ebenfalls den Kraftwerksblock nutzen können. Die Bereitstellung von Mittel- und Hochtemperaturwärme für Industrie, Kühlung und andere Anwendungen mit Hilfe von konzentrierenden Solarsystemen kann eine sehr viel größere Rolle spielen als derzeit, da die Technologie es ermöglicht, diesen Bedarf zu einem signifikanten Teil zu decken. So lassen sich die deutschen CSP-Technologien für den Export in sonnenreiche Länder stärken.

#### ■ FORSCHUNGSINHALTE

Schwerpunkt der Forschung ist die Entwicklung von technologieübergreifenden Konzepten und Pilotprojekten, um das Zusammenwirken unterschiedlicher Erneuerbare-Energien-Technologien mit Strom- und

Wärmespeichern zu untersuchen und zu optimieren. Im Hinblick auf Strom- und Wärmenetze sollen kostenoptimierte Konzepte zur verbrauchsorientierten Energieerzeugung entwickelt werden. Diese können solarthermische Kraftwerke in Verbindung mit Photovoltaik, Wind, Biomasse/Biogas, Wasserkraft und anderen Quellen berücksichtigen.

Bei der Weiterentwicklung von solarthermischen Kraftwerken im Hinblick auf eine Integration mit anderen Erneuerbaren (zum Beispiel als „solares Spitzenlastkraftwerk“ für den Abend- und Nachtbetrieb) ist die Entwicklung von Anlagen mit hohem Wirkungsgrad bei gleichzeitig hoher Flexibilität ein wichtiger Inhalt.

Darüber hinaus sind Konzepte für die verstärkte Nutzung von konzentrierenden Solaranlagen als Lieferant von Mittel- und Hochtemperaturwärme für industrielle Prozesse, solare Kühlung sowie Nah- und Fernwärme zu erarbeiten. Bei diesen Anwendungen stehen wiederum Speicherung, Integration und Anpassung an die Anforderungen der industriellen Prozesse im Vordergrund. Dabei geht es auch darum, standardisierte wettbewerbsfähige Konzepte auszuarbeiten, die leicht für viele Anwendungsfälle eingesetzt werden können.

Die Lade- und Entladedynamik der thermischen Speicher muss bei der Konzeptentwicklung und Integration betrachtet werden. Die Erweiterung von solarthermischen Kraftwerken um Power-to-Heat-Systeme zur Einkopplung und Speicherung von volatilen Wind- und Photovoltaik-Strom ist zu untersuchen.

Weitere Forschungsinhalte sind die Integration von solarthermischen Kraftwerken mit Biomasse sowie anderen erneuerbaren Brennstoffen im Hinblick auf eine weitgehende Versorgung mit erneuerbaren Energien und die Optimierung von Hybridanlagen (zum Beispiel CSP und Photovoltaik).

## ■ ERGEBNISSE

Die entsprechenden Konzepte liegen vor und wurden demonstriert. Die notwendigen Werkzeuge sind entwickelt und getestet und die deutschen Unternehmen sind vorbereitet und qualifiziert, um die integrierten Konzepte und Anlagen anzubieten.

## ■ ART DER FORSCHUNG

Konzeptstudien, Demonstrations- und Pilotanlagen

### AG 3–2. Techno-ökonomische Effizienzsteigerung

Ganzheitliche Systemoptimierung komplexer solarthermischer Kraftwerke zur planbaren netzstabilisierenden Bereitstellung kostengünstiger elektrischer Energie

## ■ MOTIVATION

Solarthermische Kraftwerke mit thermischen Speichern besitzen netzdienliche Eigenschaften der Kraftwerke mit rotierenden Massen; sie können im Verbundnetz die fossilen Kraftwerke ersetzen. Sie erlauben es, den Anteil erneuerbarer Energien mit fluktuierender Erzeugung wie Photovoltaik und Wind weiter zu steigern. Dazu müssen sie selbst in der Lage sein, hochflexibel gefahren zu werden.

In den vergangenen zehn Jahren sind die Stromgestehungskosten von etwa 30 €-Cent auf heute rund 6 €-Cent je Kilowattstunde für planbare elektrische Energie gesunken, wobei diese Zahl nicht direkt mit den Kosten nicht planbarer fluktuierender Technologien zu vergleichen ist. Dennoch sind weitere Kostensenkungen erforderlich, um den Bereich der subventionierten Nischenmärkte verlassen und weltweite Märkte erschließen zu können. Durch Kostensenkung, Wirkungsgradsteigerung und Erhöhen der Betriebsflexibilität muss die techno-ökonomische Effizienz und damit die Wettbewerbsfähigkeit gesteigert werden. Dies erfordert eine ganzheitliche Betrachtung des Systems unter Berücksichtigung aller Kernkomponenten (Solarfeld, Receiver, Speicher, Kraftwerksblock) inklusive Steuerung, Betrieb und Wartung.

## ■ FORSCHUNGSINHALTE

Schwerpunkte der Forschung sind die Entwicklung neuer und die Verbesserung bestehender Komponenten und Systeme, insbesondere von Solarturmanlagen und

linienfokussierenden Systemen, letztere vor allem mit Salzschnmelze oder anderen Hochtemperaturfluiden als Wärmeträger.

Konkrete Ziele sind Kostensenkungen und Wirkungsgradsteigerungen durch innovative Heliostatfelder und linienfokussierende Kollektoren, konzeptionell und materialseitig verbesserte Receiver, fortschrittliche Speicherkonzepte und Kraftwerksblöcke sowie Verbesserungen der Betriebsweise.

Techno-ökonomische Effizienzsteigerung ist durch innovative Kollektorkonzepte mit präzisen, kostengünstigen Antrieben, höherer Reflektivität und verbessertem Feldlayout zu erreichen. Autarke/autonome Kollektorkonzepte machen die Feldverkabelung überflüssig und senken so Kosten und Umwelteinwirkungen. Zur weiteren Receiver- und Feldwirkungsgradsteigerung dienen verbesserte Zielpunktstrategien. Die Receiver selbst werden durch hochtemperatur- und zyklensichere Materialien und optimierte optische und thermische Eigenschaften weiter verbessert.

Thermische Speicherkonzepte sind hinsichtlich einer verbesserten Lade- und Entladedynamik, erweitertem Temperaturbereich, höherer Speichereffizienz und Kostensenkung weiterzuentwickeln. Dies betrifft insbesondere Feststoffspeicher, Flüssigsalzspeicher, Latentwärmespeicher und thermochemische Speicher für Temperaturen > 150 °C mit Aspekten in den Bereichen Material- und Komponentenentwicklung, Wärmetransport, Thermomechanik, Thermochemie und Systemintegration. Forschung zum Kraftwerksblock schließt überkritische, hochdrehende Dampfturbinen mit für CSP-Anwendungen angepasster Leistung einschließlich anwendungsoptimierter Werkstoffe ebenso ein wie Turbinen mit optimierter Schaufel- und Dichtungstechnologie sowie Komponenten und Betriebskonzepte für CO<sub>2</sub>-Kreisläufe. Weiter sollen angepasste Turbinendesigns und optimierte Fahrweisen erforscht werden, welche Ertragssteigerung durch Anpassungen an die speziellen Betriebsbedingungen (insbesondere große Anzahl Lastwechsel und An- und Abfahrvorgänge) erreichen.

## ■ ERGEBNISSE

Innovative Komponenten und (Sub-)Systeme einschließlich deren Betriebsweisen, gekennzeichnet durch deutlich reduzierte Stromgestehungskosten bei erhöhter Betriebsflexibilität und Lebensdauer im Vergleich zu bestehenden und derzeit im Bau befindlichen Anlagen.

## ■ ART DER FORSCHUNG

Angewandte Forschung und Demonstrationsvorhaben, Studien zu Systemanalyse- und Optimierung

### AG 3–3. CSP 4.0

Nutzung innovativer digitaler Technologien, um die Kosten von CSP-Kraftwerken zu senken sowie deren Effizienz und Zuverlässigkeit zu steigern

## ■ MOTIVATION

Der Bereich der CSP-Kraftwerke ist derzeit noch stark durch traditionelle industrielle Verfahren geprägt. Durch zunehmende internationale Konkurrenz wächst innerhalb der deutschen CSP-Industrie der Druck nach ständigen Innovationen. Hier bietet die Digitalisierung ein bislang noch viel zu wenig erschlossenes Potenzial. Deutsche, insbesondere mittelständische Unternehmen nehmen in diesem Bereich weltweit eine Vorreiterrolle ein. Diese gilt es, auf den CSP-Bereich zu übertragen.

Additive Herstellungsverfahren können Fertigungskosten senken, moderne Datenauswertungsverfahren tragen zur Performancesteigerung bei und netzgestützte Überwachungsmethoden helfen, die Wartungskosten zu reduzieren. Alles mit dem Ziel, Strom aus solarthermischen Kraftwerken kostengünstiger und noch zuverlässiger zu erzeugen, die Abhängigkeit von Design- und Bedienungsfehlern zu reduzieren sowie Planungs- und Bauzeiten zu verkürzen.

Insgesamt stellt die Integration digitaler Technologien eine zusätzliche Wertschöpfung für deutsche Unternehmen dar, deren intellektueller Mehrwert sich im Vergleich zum Komponentendesign leichter gegenüber Wettbewerbern schützen lässt.

## ■ FORSCHUNGSINHALTE

Da CSP-Kraftwerke jeweils individuelle, aber immer ähnliche Anlagen sind, soll untersucht werden, in wieweit IT-basierte integrale Planungsverfahren zur Vereinfachung, Verkürzung und Optimierung von Planung, Fertigung und Betrieb eingesetzt werden können. Diese Methode hat im Gebäudebereich in den letzten Jahren unter dem Begriff Building Information Modeling (BIM) Einzug gehalten. Bei einer konsequenten Adaption dieser Methode entsteht am Ende eine virtuelle Version des Kraftwerks, das für weitere

Anlagenoptimierung, aber auch zu Schulungszwecken verwendet werden könnte.

Die Schlüsselkomponenten bestimmen wesentlich die Kosten eines CSP-Kraftwerks. Diese werden noch weitgehend mit traditionellen Fertigungsverfahren hergestellt. Additive Herstellungsverfahren haben noch nahezu keinen Einzug in die Herstellung der Komponenten gehalten. Durch die rasante Entwicklung dieser Verfahren entstehen jedoch neue Möglichkeiten für die CSP-Industrie, zum Beispiel bei der Herstellung von Heliostaten, Kollektoren oder Receivern. Der Einsatz von digitalen Fertigungsmethoden muss stärker untersucht bzw. das Know-how aus anderen Bereichen übertragen werden. Dies führt zudem zur Verkürzung von Innovationszyklen.

In CSP-Kraftwerken wird eine Vielzahl von Einzelkomponenten verbaut, die zudem über eine große Fläche verteilt sind. Mit moderner Datenverarbeitungstechnik ist es möglich, große Mengen an Daten schnell zu erfassen und zu analysieren (Big Data), die dann direkt zur Betriebsoptimierung verwendet werden können. So kann zum Beispiel optische Messtechnik etwa mittels Flugdrohnen zur Erfassung des Betriebs-, Verschmutzungs- und Degradationszustands von kompletten Solarfeldern und Receivern eingesetzt werden. Maschinelles Lernen, angewandt auf große Betriebsdatenmengen, soll zur Vereinfachung und Optimierung des Kraftwerksbetriebs und damit zur Senkung von Betriebskosten beitragen. Weiter verbessert wird die Anlagen- und Feldsteuerung durch präzisere hochaufgelöste lokale Wetterdaten, speziell der Direktstrahlung, der Staubbelastung und der Windgeschwindigkeit.

Schließlich kann die Entwicklung von Fernüberwachungs- und -steuerungssystemen zur Erhöhung der Verfügbarkeit, Verlängerung der Komponentenlebensdauer und Gesamtsystemoptimierung beitragen.

Darüber hinaus sollen weitere Möglichkeiten untersucht werden, neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Digitalisierung (Stichwort IoT) für den CSP-Markt zu erschließen.

## ■ ERGEBNISSE

Neue Produkte deutscher Hersteller. Verkürzung der Entwicklungszyklen. Neue prädiktive Wartungskonzepte. Geringere Planungs- und Bauzeiten.

## ART DER FORSCHUNG

Angewandte Forschung, Verifizierung in Testanlagen und kommerziellen Systemen, Vorserienentwicklung sowie Demonstrationsvorhaben

### AG 3–4. Vorbereitung von Standards für solarthermische Kraftwerke

Entwicklung von Mess- und Prüfverfahren, um die Qualität von Komponenten und Subsystemen zu erfassen und so technischen Risiken und Kosten bei der Integration in ein komplexes Kraftwerkssystem zu senken

#### ■ MOTIVATION

Solarthermische Kraftwerke sind komplexe Systeme, die aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten unterschiedlicher Hersteller bestehen. Damit solche Systeme zuverlässig die erwarteten Erträge liefern, ist es notwendig, Komponenten- und Subsystemeigenschaften zu definieren und Messverfahren zu entwickeln und zu standardisieren, mit denen diese überprüft werden können. Solche Standards existieren seit langer Zeit für die konventionelle Kraftwerkstechnik. Für den Solarteil der solarthermischen Kraftwerke sind solche Entwicklungen insbesondere für die Parabolrinnentechnik erst in den letzten zehn Jahren begonnen worden. Weitere Ergänzungen, zum Beispiel in Bezug auf neue Wärmeträgerfluide, sind jedoch notwendig. Im Bereich der Solarturmsysteme, deren Marktanteil stetig anwächst, besteht zudem erheblicher Nachholbedarf. Die Entwicklung von Mess- und Prüfverfahren, die die Qualität von Komponenten und Subsystemen beschreibt, ist eine wichtige Voraussetzung, um solche Standards entwickeln zu können. Stehen sie zur Verfügung, ist es für Generalunternehmer von solarthermischen Kraftwerken einfacher möglich, die Qualität konkurrierender Produkte zu vergleichen, eine verlässlichere Auslegung des Gesamtsystems, eine bessere Übergabe an den Endkunden und einen reibungslosen Betrieb der Anlage sicherzustellen. Dies erhöht die Transparenz und Zuverlässigkeit der Systeme, senkt durch einen höheren Wettbewerbsdruck die Komponenten- und Subsystemkosten und reduziert den Planungsaufwand für das System. Es ist im Interesse der deutschen Industrie, an der Definition solcher Standards mitzuwirken, um Interessen ausländischer Wettbewerber etwas entgegenzusetzen zu

können. Dies erhöht insbesondere auch in den Exportmärkten die Absatzchancen von Produzenten qualitativ hochwertiger Produkte.

#### ■ FORSCHUNGSINHALTE

Schwerpunkte der Forschung sind die Entwicklung und der Vergleich von Mess- und Prüfverfahren für Komponenten und Subsysteme. Bei den Solarturmsystemen bezieht sich dies besonders auf die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Heliostaten und Heliostatfeldern, die Eigenschaften von optischen Schichten auf Hochtemperatur-Receiverflächen und die Kompatibilität von Receiverkomponenten mit Wärmeträgerfluiden wie zum Beispiel Salzschnmelzen. Ferner müssen Messverfahren entwickelt werden, um die Leistungsfähigkeit von Speichermaterialien und -systemen zu beschreiben. Für linienfokussierende Systeme (Parabolrinnen- und Linear-Fresnel-Systeme) sind insbesondere Messverfahren für die Leistungsprüfung im Solarfeld und die Qualifizierung der Receiver und ggf. Sekundärspiegel weiterzuentwickeln. Außerdem sind Messverfahren zur Bestimmung der Diffusion von Wasserstoff in das evakuierte Hüllrohr des Receiverrohrs als wichtige zusätzliche Lebensdauereigenschaft zu entwickeln.

Die entwickelten Mess- und Prüfverfahren müssen in Bezug auf ihre Genauigkeit abgesichert sein sowie eine Robustheit aufweisen, die einen Einsatz in einem standardisierten Prüflabor oder in situ ermöglicht. Die Entwicklung solcher Verfahren soll international abgestimmt erfolgen. Dazu ist eine hohe Präsenz der deutschen Interessenvertretung nötig.

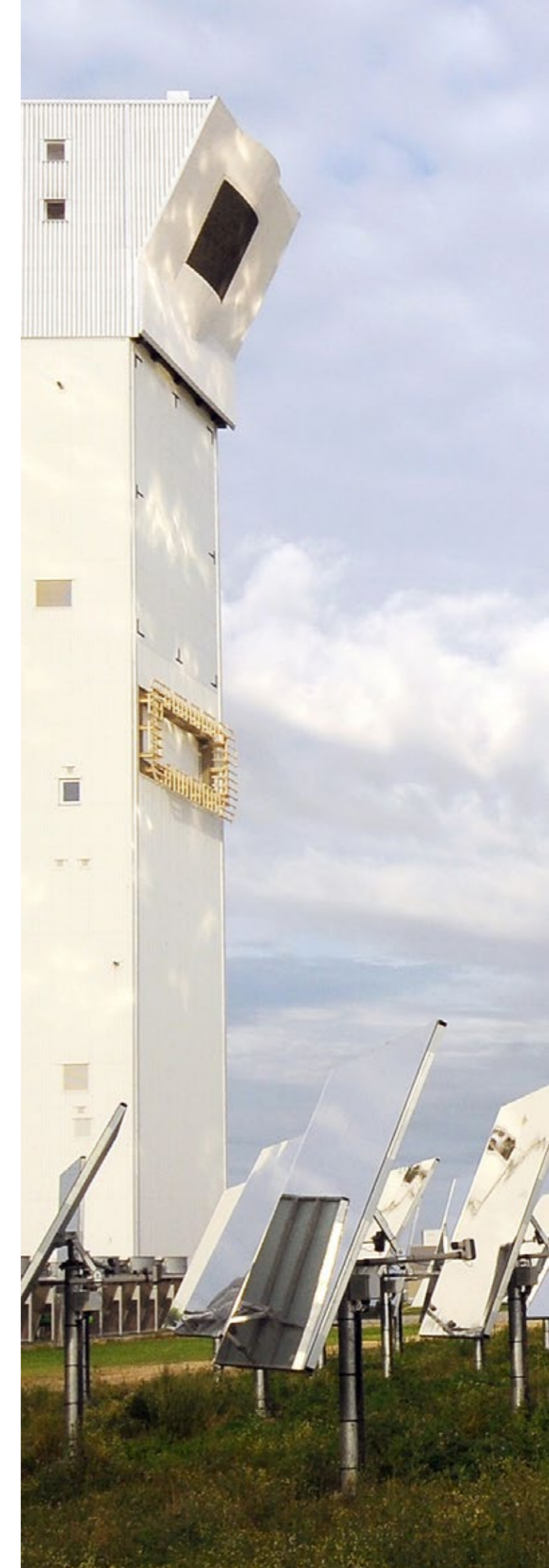
#### ■ ERGEBNISSE

Die detaillierte Dokumentation der entwickelten Mess- und Prüfverfahren steht öffentlich zur Verfügung. Es existieren zudem Leistungsvergleiche verschiedener Messsysteme, die im Rahmen von Round-Robin-Tests erstellt wurden. Diese Informationen sind in internationalen Richtlinien-Ausschüssen und Normungsgremien eingebracht worden und dienen als Grundlage für internationale Standards in diesem Bereich. Die entwickelten Messsysteme stehen zur Qualifizierung von Produkten für kommerzielle Kraftwerksprojekte zu Verfügung. Die Ergebnisse solcher Tests fließen in eine internationale Produktdatenbank ein. Die Einhaltung der entwickelten Standards ist im Rahmen der Finanzierung von

solarthermischen Kraftwerksprojekten durch deutsche Förderbanken verpflichtend.

#### ■ ART DER FORSCHUNG

Angewandte/pränormative Forschung, abgestimmt im Rahmen von internationalen Initiativen (zum Beispiel IEA SolarPACES)



# AG 4 SYSTEMINTEGRATION, STOFFLICHE UND THERMISCHE SPEICHERUNG

Bei stark zunehmender Strom- und allgemeiner Energieversorgung durch erneuerbare Energien wird es von herausragender Bedeutung sein, die naturgegebene Fluktuation erneuerbarer Energien mit flexiblen Energieumwandlungs- und Nutzungs-Ketten beherrschbar zu machen. Dabei ist es wichtig, zu bestimmten Zeitpunkten erzeugte Energie – insbesondere Strom, der über die Nachfrage hinaus produziert worden ist – einer ökonomisch sinnvollen Verwendung zuzuführen. Des Weiteren benötigt erneuerbare Energie langfristige Speicherung über Wochen, Monate und Jahreszeiten hinweg, um die Energieversorgung auch in Zeiten geringer oder ausfallender Erträge erneuerbarer Energie sicherzustellen.

Für diese beiden Kernaufgaben sind die folgenden Themenfelder identifiziert worden:

- Elektrolyse
- Stoffliche Nutzung von Kohlenstoff
- Kurzzeitspeicherung
- Langzeitspeicherung
- Thermische Speicher

Diese Themenfelder beschreiben die Technologien, um die obigen Ziele zu erreichen. Diesen Themen gemeinsam ist, dass eine sehr schnelle Umwandlung des Stroms zu chemischen Energieträgern erfolgen muss, im ersten Schritt meistens zu Wasserstoff und darauf in Teilen zu Kohlenwasserstoffen. Solche Anlagen werden aufgrund komplexer Strukturen und Betriebsanforderungen einer gewissen Größe bedürfen und daher zentralen Charakter haben. In Ergänzung zu solchen, sehr zentralen Anlagen ergibt sich für die Zukunft noch die wesentliche Forderung, dass aufgrund des überwiegend dezentralen Charakters der erneuerbaren Energien Anlagen auch in kleinerem Maßstab effizient sein müssen. Die Themenblätter haben dadurch einen starken Schwerpunkt in der Speicherung und wurden so ausgestaltet, dass sie die Thematik von grundlegenden, wissenschaftlich-technischen Fragestellungen bis hin zu ökonomischen,

infrastrukturellen und Akzeptanzfragestellungen ganzheitlich beschreiben.

Der flexiblen Energieumwandlung kommt daher eine besondere Bedeutung bei der Sektorkopplung sowie bei der Etablierung geschlossener Stoffkreisläufe zu. Sie ermöglicht auch Sektoren, die nicht oder nicht so einfach Strom direkt verwenden können, den indirekten Zugang zu Strom aus regenerativen Energiequellen.

## THEMEN | AG 4:

- AG 4–1. Elektrolyse
- AG 4–2. Stoffliche Nutzung von Kohlenstoff
- AG 4–3. Kurzzeitspeicherung
- AG 4–4. Langzeitspeicherung
- AG 4–5. Thermische Speicher

### AG 4–1. Elektrolyse

#### ■ MOTIVATION

Die Wasserelektrolyse stellt eine wesentliche Grundlage zur Kopplung der Stromwirtschaft mit anderen Sektoren wie Verkehr, Industrie und Haushalten dar. Sie eröffnet einen Weg zur großskaligen Langzeitspeicherung von Strom aus regenerativen Energiequellen in Gasen und Flüssigkeiten. Als Basistechnologie vieler in AG 4 behandelte Prozesse kommt auch der Einbindung in bestehende Infrastrukturen, technoökonomische Fragestellungen und Fragen zur Akzeptanz Bedeutung bei.

#### ■ FORSCHUNGSINHALTE

System- und Technologieebene:

- Erarbeitung von Einsatzoptionen und Anforderungen an Elektrolyseure sowie Demonstration großer Elektrolyseure und deren Einbindung in das Energiesystem einschließlich Begleitforschung
- Generierung bzw. Weiterentwicklung der Einsatzoptionen der Elektrolyseprodukte
- Performance-, Dynamik- und Lebensdaueruntersuchung im virtual lab mit Modellierung
- Wirtschaftlichkeitsanalysen zu Elektrolyseurkonzepten (Skalierung, dezentral versus zentral)
- Kopplung von Elektrolyse mit Stoffwandlungsprozessen für CO<sub>2</sub>-tolerante Synthesen (ggfs. Nutzung von O<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>)
- Reinheit der Elektrolyseprodukte (Kriterien, Standards etc.)
- Sicherheitsanalysen und –anforderungen wasserstoffführender Speichersysteme

Prozess- und Werkstoffebene:

- Stackforschung, PEM-Elektrolyse und alkalische Elektrolyse

- Weiterentwicklung SOE (Hochtemperatur-Elektrolyse) und Co-Elektrolyse (HT-Werkstoffe und Fügetechnologien; Protonenleiter für SOE)
- Druck- und Hochdruck-Elektrolyse
- Steigerung der Effizienz, Skalierung der Leistung, Reduzierung des Einsatzes von hochpreisigen Materialien, Verbesserung von Haltbarkeit und Degradationsverhalten
- Kostenreduktion (Massenproduktion, Upscaling der Elektrolyse-Stacks)
- Pt/Ir-freie Katalysatoren für saure Elektrolyse
- Alkalische Elektrolyseure mit hoher Leistungsdichte
- Meerwasserelektrolyse
- Hybridisierung von Elektrolyseuren mit Batterien, thermischen und chemischen Speichern
- Dynamischer Betrieb (Teil-, Mindestlast, Gradienten etc.; Modellierung und Simulation)

#### ■ ERGEBNISSE

Die Ergebnisse müssen zu kosteneffizienten Elektrolyseuren führen, die in Leistungsklassen vom kW-Bereich bis in den zweistelligen MW-Bereich darstellbar sind und von ihrer Lebensdauer und Dynamik den Anforderungen aus den Anwendungen entsprechen.

#### ■ ART DER FORSCHUNG

Die Forschung erstreckt sich von anwendungsgetriebenen Arbeiten der Grundlagenforschung bei Elektrokatalysatoren und Materialien über Anlagentechnik bis hin zu der Schnittstelle zur Systemintegration, die die Anforderungen an die Elektrolyseure vorgibt. Des Weiteren werden Demonstrationsprojekte, auch in Form von virtual labs und Reallaboren und deren Forschungsbegleitung angestrebt.

## AG 4 – 2. Stoffliche Nutzung von Kohlenstoff

### ■ MOTIVATION

Das Ziel ist die Implementierung von Technologien zur Schließung des Kohlenstoffkreislaufs vorrangig für heimische Kohlenstoffquellen durch Transformation von der linearen zur Kreislaufwirtschaft. Dies unterstützt den Strukturwandel in den Braunkohleregionen, liefert einen Beitrag zur Lösung des Kreislaufproblems für Müll und zeigt die Einbindungsmöglichkeiten in vorhandene Infrastrukturen.

### ■ FORSCHUNGSINHALTE

System- und Technologieebene:

- Bewertung und Demonstration direkter stofflicher Nutzungspfade und Kreisläufe (zum Beispiel virtual labs, Closed Carbon Cycle)
- Bewertung und Demonstration effizienter Sektorkopplung (zum Beispiel Chemie, Abfall & Energie)
- Erstellung von lebenszyklusbasierten Kosten-, Energie-, Emissions- und Stoffbilanzen
- Konzeptentwicklung für zentrale (Industriestandorte) und dezentrale (kommunale) Anlagen
- Analyse der sozialen Akzeptanz und Erarbeitung der Anforderungen an politische Rahmenbedingungen
- Metastudie zur internationalen Dimension

Prozess- und Werkstoffebene:

- Hochtemperaturbeständige Werkstoffe und Fügeverfahren für reduzierende Atmosphären
- Prozesse mit vollständiger C-Transformation im Synthesegas, inklusive scale-up
- Direkte Stromeinkopplung in endotherme Prozesse mit Plasma, Widerstand, Mikrowelle etc.
- Selektive Wäschen für Synthesegase zur Entfernung von Schadstoffen außer CO<sub>2</sub>
- Prozesse der Aufbereitung und Einspeisung heterogener Einsatzstoffe, Brennstoffflexibilität

- Synthesen mit Einkopplung „grünen“ Wasserstoffs
- Chemische Reaktoren für CO<sub>2</sub>-tolerante Synthesen sowie Katalysatorentwicklung
- XtChem- und XtL-Prozesse, insbesondere deren Flexibilisierung
- Nutzungskonzepte für Problem-Reststoffe (Kohlefaser, Schredder-Leichtgut etc.)
- Stoffcharakterisierung von Kohlenstoffquellen („Carbothek“) und Wertstoffrückgewinnung

### ■ ERGEBNISSE

Nach Abschluss der Arbeiten liegen abgesicherte Kenntnisse zu Technologien und neue Lösungen zur stofflichen Kohlenstoffnutzung im Bereich Prozesse, Reaktoren und Materialien vor. Daraus erwächst die Fähigkeit zur Skalierung und Markteinführung im industriellen Maßstab. Basierend auf der Bewertung der Forschungsergebnisse werden politische Handlungsempfehlungen vorgenommen.

### ■ ART DER FORSCHUNG

Die interdisziplinäre Forschung erstreckt sich von den Grundlagen bis zur Anwendung im Demonstrationsmaßstab. Dies beinhaltet Systembetrachtungen sowie die experimentelle und modellgestützte Verifizierung der Technologien, Begleitforschung zu Demonstrationsprojekten sowie sozioökonomische und Akzeptanzfragen.

## AG 4 – 3. Kurzeitspeicherung

### ■ MOTIVATION

Das Ziel ist die Weiter- und Neuentwicklung von umweltverträglichen Technologien und Konzepten für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen und die Kurzeitspeicherung. Hierdurch soll eine Flexibilisierung der Erzeuger und der Lasten erreicht und die Integration von erneuerbaren Energien verbessert werden.

### ■ FORSCHUNGSINHALTE

System- und Technologieebene:

- Speicherentwicklung zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen (Momentanreserve, Regelleistung,

Spannungshaltung, Blindleistung, Kurzschlussleistung, Schwarzstartfähigkeit, Kosteneffizienz und Umweltverträglichkeit)

- Wärmespeicherintegration und Kostenanalyse für zum Beispiel Flüssig-Luft-Speicher, adiabate Druckluftspeicher etc.
- Entwicklung von Konzepten zur Laststeuerung und Flexibilisierung der Stromnachfrage von Industrie, Verkehr und Haushalten
- Sonstige Tagesenergiespeicher (zum Beispiel Hohlkugel, Strom-Wärme-Stromspeicher)
- Speicherung versus direkte Stromnutzung und Entwicklung von direkten Stromnutzungsoptionen (Power-to-Heat, Elektrifizierung von Industrieprozessen etc.)
- Einsatz großskaliger H<sub>2</sub>-Speicher zur Kurzeitspeicherung (Oberschwingungsmodus)
- Technische H<sub>2</sub>-Gasspeicher zur dezidierten Kurzeitspeicherung
- Entwicklung von zukünftigen Betriebs- und Geschäftsmodellen (dezentral versus zentral, Multi-use-Speicher, wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen, Regularien etc.)

Prozess- und Werkstoffebene:

- Weiterentwicklung elektromagnetischer und elektrostatischer Direktspeicher
- Batterieentwicklung: Redox-Flow-Batterien, Li-Ionen-Batterien, Li-Schwefel-, Li-Luft- und Metall-Luft-Batterien
- Re-Use-Konzepte gebrauchter Batterien
- Entwicklung hocheffizienter Schwungmassenspeicher: Selbstentladung, Leistungsdichte
- Anwendung thermischer Hochleistungsspeicher (direktverdampfende Latentwärmespeicher, thermochemische Speicher, kryogene Speicher etc.)

### ■ ERGEBNISSE

Nach Abschluss der Forschung stehen neue Konzepte zur Kurzeitspeicherung sowie gesicherte Erkenntnisse zu

neuen Technologien zur Verfügung. Hierdurch kann ein Beitrag zur Integration der erneuerbaren Energien geleistet werden, die im Rahmen der Energiewende erforderlich wird. Zusätzlich können hieraus Handlungsempfehlungen für die Politik abgeleitet werden.

### ■ ART DER FORSCHUNG

Es werden Systembetrachtungen, Konzeptentwicklungen und experimentelle Untersuchungen der Technologien und Demonstrationen, auch in virtual labs und Real-laboren, durchgeführt. Dies schließt sozioökonomische Themen ein.

## AG 4 – 4. LANGZEITSPEICHERUNG

### ■ MOTIVATION

Langzeitspeicherung wird bei hohen Anteilen erneuerbarer Energie und insbesondere Strom aus regenerativen Energiequellen aus zwei Gründen wichtig. Einerseits können damit wetterbedingte Ertragsausfälle erneuerbarer Energie, die von einzelnen Tagen bis zu einigen Wochen gehen, überbrückt werden; andererseits erlaubt die Langzeitspeicherung auch saisonale Überschüsse zu speichern und in Zeiten zu geringer Produktion wieder zu nutzen. Ersteres garantiert Versorgungssicherheit, letzteres verbessert die räumliche Nutzung und potenziell die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems. Systeme zur Langzeitspeicherung können auch zum Ausgleich kurzfristiger Schwankungen herangezogen werden.

### ■ FORSCHUNGSINHALTE

System- und Technologieebene:

- Einsatzanalyse, Systemkonzeptentwicklung, Entwicklung und Implementation von Demonstratoren von Langzeitspeichern zur Versorgungssicherheit (> 30 TWh) und zur saisonalen Speicherung in technischer, sozioökonomischer und rechtlicher Hinsicht
- Entwicklung geeigneter Finanzierungs- und Geschäftsmodelle sowie Ausbauszenarien
- Nutzung der Langzeitspeicher, insbesondere der saisonalen Speicherung, zur Sektorkopplung:
  - Kopplung Transport- und Stromsektor (zum Beispiel alternative gasförmige und flüssige Treibstoffe)

- Kopplung Industrie, insbesondere des Prozessindustriesektors mit dem Stromsektor
- Konzepte zur wirtschaftlichen Nutzung von Überschüssen wie Verknüpfung von Strom- und Wärmespeicherung, Gasspeicherung etc.
- Erarbeitung der Rolle von Langzeitspeichern in Erneuerbaren-Energien-Konzepten mit minimalem CO<sub>2</sub>-Footprint unter Berücksichtigung der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten
- Erforderliche Infrastruktur zur Integration der Erneuerbaren-Energien-Langzeitspeicherung
- Netzintegration, Netzstabilisierung und Systemdienstleistungen im Stromnetz
- Erarbeitung von Markthochlaufszenerarien für Langzeitspeicher zur Zielerreichung 2050

#### Prozess- und Werkstoffebene:

- Langzeitverhalten und Korrosion der Werkstoffe der Speicher- und Transporteinrichtungen
- Untersuchung der flexiblen Strom-Einkopplung in vorhandene Verarbeitungsprozesse der chemischen Industrie einschließlich der Zwischenspeicherung von Reaktanden
- Flexibel nutzbare chemische Speicherstoffe als Energiespeicher, Edukte, Intermediate, chemische Produkte und unkonventionelle Speicherstoffe

#### ■ ERGEBNISSE

Nach Abschluss der Arbeiten liegen abgesicherte Kenntnisse zu Technologien und neue Lösungen zur kosteneffizienten Langzeitspeicherung im systemischen Umfeld vor. Wirtschaftlich sinnvolle und rechtlich gangbare Wege zur Implementation und zum Hochlauf von Langzeitspeichern werden vorliegen. Diese münden in politische Handlungsempfehlungen. Daraus erwächst die Fähigkeit zur Skalierung und Markteinführung im industriellen Maßstab.

#### ■ ART DER FORSCHUNG

Die interdisziplinäre Forschung erstreckt sich von den Grundlagen bis zur Anwendung im Demonstrationsmaßstab auch in virtual labs und Reallaboren. Dies

beinhaltet Systembetrachtungen, die experimentelle Verifizierung der Technologien, sozioökonomische Fragen und Akzeptanzforschung.

### AG 4 – 5. Thermische Speicher

#### ■ MOTIVATION

Durch seinen über 50-prozentigen Anteil an der Endenergie ist der Wärmeverbrauch in Industrie, bei Kleinverbrauchern und in Gebäuden eine wichtige Größe bei der Energiewende. Zur Erreichung der Dekarbonisierungsziele ist die Effizienzsteigerung im Wärmesektor, insbesondere im Hochtemperaturbereich ab 150°C zwingend notwendig. Thermische Energiespeicher für die bedarfsgerechte Bereitstellung von Wärme, Kälte und – indirekt – Strom sind dabei unverzichtbar. Aufgaben sind die Speicherentwicklung zur Bereitstellung von Wärme einschließlich Rückverstromung zum Beispiel von Strom aus regenerativen Energiequellen, die Dekarbonisierung der Wärmebereitstellung aus eben solchem Strom, die Einbindung der Solarthermie sowie die Effizienzsteigerung der Wärmenutzung.

#### ■ FORSCHUNGSINHALTE

##### System- und Technologieebene:

- Potenzialanalysen für Industrieprozesse, Kraftwerkstechnik und Wärmenetze, inklusive
- Technoökonomie der unterschiedlichen Speicheranwendungen, Erarbeitung geeigneter Geschäftsmodelle, Auswirkung energiepolitischer Rahmenbedingungen
- Infrastrukturanalyse zur Sektorkopplung von Strom, Wärme, Kälte, Mobilität und industriellen Prozessen (zum Beispiel sektorübergreifende KWK und Power to Heat)
- Entwicklung von Speicherkonzepten (inklusive Elektroheizung und weiterer Subkomponenten) für eine verbesserte Lade- und Entladedynamik, höhere Speichereffizienz sowie wettbewerbsfähige Speicherkosten für Feststoffspeicher, Flüssigsalz- und Flüssigmetallspeicher, Latentwärmespeicher und thermochemische Speicher, insbesondere im Mittel- und Hochtemperaturbereich sowie Kältespeicher

- Speicherintegration in energieintensiven Industrien, Kraftwerksprozessen und Wärmenetzen
- Transport von Hochtemperaturwärme

##### Prozess- und Werkstoffebene:

- Detailverständnis thermischer, mechanischer und chemischer Vorgänge
- Optimierte Materialien für sensible, latente und thermochemische Speicher, insbesondere im Mittel- und Hochtemperaturbereich

#### ■ ERGEBNISSE

Nach Abschluss der Arbeiten liegen verbesserte Speicherlösungen für flexibilisierte und effizienzverbesserte Prozesse in Industrie, Kraftwerken, Wärmenetzen und für die Nutzung an der Strom-Wärme-Sektorgrenze vor. Ein zentrales Ziel ist hierbei die Pilotierung und Demonstration der Speichereinbindung – auch in bestehende Infrastrukturen – mit der Effizienzsteigerung im System sowie der Transfer von technischen Speicherlösungen in identifizierte neue Anwendungsfelder.

#### ■ ART DER FORSCHUNG

Es handelt sich um breit angelegte, anwendungsgetriebene Forschungsarbeiten von Materialfragen und dem grundlegenden Verständnis (etwa zu Thermochemie) über technische Lösungen für die jeweiligen Anwendungen bis hin zur Systemintegration als Schnittstelle und Demonstration in virtual labs und Reallaboren einschließlich sozioökonomischer und Akzeptanzfragen.



# AG 5 TURBOMASCHINEN

Deutschland ist auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung. So sollen bis 2050 80 Prozent der Stromversorgung aus Anlagen mit erneuerbaren Energien stammen.

Die Turbomaschinentechnologie ist für diese Energiewende ein Schlüsselement. So werden Turbomaschinen zum Wandeln, Speichern und Transportieren der erneuerbaren Energien benötigt. Turbomaschinen sind zentrale Komponenten der Power-to-X-to-Power-Technologien, zur Herstellung von synthetischen und biologischen Kraftstoffen sowie für die Wasserstofftechnik. Auch Solar- und Geothermie sowie die Wasserkraftwerke und die Pumpspeicher sind auf sie angewiesen. Zudem sind dezentrale Erzeugungs- und Verteilungssysteme ohne sie auch künftig nicht denkbar, insbesondere wegen der energetisch sinnvollen Kraft-Wärme-Kopplung. Die enge Integration der Turbomaschinen in die Prozesse zur Versorgung mit erneuerbaren Energien mit ihren herausfordernden Betriebsweisen und Medien definieren hierbei die Forschungsaufgaben der Zukunft.

Darüber hinaus garantieren die Turbomaschinen (Verdichter, Brennkammern und Turbinen) in den konventionellen Kraftwerken noch auf Jahrzehnte in Deutschland und der restlichen Welt die Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Netzstabilität der Stromversorgung, denn sie liefern die zum Ausgleich der volatilen erneuerbaren Ressourcen nötige Residualleistung. Der moderne und große deutsche Kraftwerksbestand bietet hierbei die Möglichkeit, eine optimale Systemintegration von erneuerbarer und konventioneller Stromerzeugung zu realisieren, und garantiert den nachhaltigen Übergang hin zu regenerativen Energien. Die Anpassung der Bestands- und Neuanlagen an die nötige Betriebs- und Brennstoffflexibilität unter Beibehaltung der bereits sehr hohen Effizienz, der Lebensduranforderungen und der geringen Schadstoffemissionen fordern die Forschung heraus.

Der wirtschaftliche Erfolg der deutschen Kraftwerks- und Turbomaschinenindustrie wird wesentlich im Export erzielt. Damit trägt die deutsche Turbomaschinenentwicklung einen wesentlichen Anteil an der Bewältigung der globalen Herausforderungen im Bereich des Klimaschutzes.

Deshalb gilt es, neben der genannten Flexibilisierung insbesondere auch weiterhin die höchsten Wirkungsgrade bei Grundlastkraftwerken mit gleichzeitig geringsten Schadstoffemissionen zu erreichen, um so die internationale Energienachfrage zu befriedigen und für einen weltweiten Umweltschutz zu sorgen.

Die Hochtechnologie der Turbomaschinenprodukte, die vielfältigen Anwendungen mit oft divergierenden Anforderungen und der harte internationale Wettbewerb verlangen nach modernsten Methoden für die Entwicklung, die Auslegung und zum Betrieb der Anlagen. Die Technologien der Digitalisierung bzw. Virtualisierung sind hierbei gerade in jüngerer Zeit zum Wettbewerbsvorteil geworden und werden daher einen wesentlichen Einfluss auf die zukünftige Forschung ausüben. Dabei gilt es insbesondere, die hochauflösenden und multidisziplinären Simulationsverfahren zur Auslegung und Analyse der Turbomaschinen weiterzuentwickeln und sie mit der digitalisierten Produktion und den digitalen Systemen zur Erfassung und Interpretation von Betriebsdaten zu verbinden. Hier kann gerade die deutsche Turbomaschinenindustrie ihre Vorreiterrolle weiter ausbauen.

Die genannte Hochtechnologie wird letztendlich immer von Menschen entwickelt und bereitgestellt. Neben der Erreichung der gesetzten Technologieziele der Turbomaschinen gilt es daher insbesondere, auch die Wissenschaftler und Ingenieure an den Hochschulen und in der Industrie bestmöglich auszubilden und miteinander eng zu vernetzen. Hier haben die Energieforschungsprogramme der Vergangenheit Deutschland eine internationale Spitzenposition verschafft. Diese gilt es zu sichern und auszubauen.

## AG 5 – 1. Technologieentwicklung für die Gasturbine der Zukunft

In Deutschland und Europa werden die Anforderungen an die Gasturbine wesentlich durch die Energiewende beeinflusst. Auf dem Weltmarkt stehen insbesondere höchste Wirkungsgrade bei gleichzeitiger Schadstoffemissionsreduktion und Brennstoffflexibilität im Fokus.

## THEMEN | AG 5

AG 5 – 1. Technologieentwicklung für die Gasturbine der Zukunft

AG 5 – 2. Technologieentwicklung für die Dampfturbine der Zukunft

AG 5 – 3. Hydraulische Turbomaschinen

AG 5 – 4. Dezentrale Energieumwandlung (Hochflexible Gasturbinen, Mikrogasturbinen, Gasmotoren)

AG 5 – 5. Turbokomponenten für innovative Prozesse

### ■ MOTIVATION

Die Anforderungen an zukünftige Gasturbinen sind ein hoher Wirkungsgrad und schadstoffarme Verbrennung bei gleichzeitiger Flexibilität in Hinsicht auf Fahrweisen und Nutzung regionaler und unterschiedlichster Brennstoffe. Bei flexiblem Betrieb ist die Sicherstellung hoher Lebensdauer von Bedeutung, die eine zuverlässige Quantifizierung der Schädigungsmechanismen voraussetzt. Im Rahmen der Technologieentwicklung sollen die Komponenten der Gasturbine im Hinblick auf die gestiegenen Anforderungen weiterentwickelt werden.

### ■ FORSCHUNGSINHALTE

Die notwendigen Forschungsaktivitäten umfassen die gesamte Gasturbine (Verdichter, Brennkammer, Turbine) von der Auslegung über die Fertigung bis zur Betriebsüberwachung und zum Service, wobei die aus der Digitalisierung entstehenden Möglichkeiten in allen Bereichen konsequent zu nutzen sind, um „Time-to-Market“ und Kosten bei gleichzeitigem Performancegewinn zu reduzieren. Konkret bedeutet dies beispielsweise:

- Entwicklung und Validierung hocheffizienter Kühl- und Dichtungskonzepte
- Entwicklung und Qualifizierung von metallischen und keramischen Hochtemperaturwerkstoffen und besonders wirksamen Wärmedämmschichten
- Bauteiloptimierung unter Nutzung additiver Fertigungsverfahren
- Entwicklung von Verdichtern für höhere Stufendruckverhältnisse, höhere Wirkungsgrade und erweiterten Betriebsbereich
- Entwicklung von emissionsreduzierten Verbrennungskonzepten insbesondere für die Rückverstromung synthetischer Brennstoffe
- Entwicklung von flexiblen Verbrennungskonzepten, die bis in den niedrigen Teillastbereich hohe Effizienz mit niedrigen Emissionen verbinden

- Methoden zur Vorhersage und Reduzierung von Brennkammerschwingungen
- Dynamische, interdisziplinäre Modellierung des Gesamtsystems Gasturbine mit Fokus auf die Komponenteninteraktion
- Belastungs- und Lebensdauervorhersagemodelle für vorwiegend außerhalb des Auslegungspunktes betriebene Komponenten
- Entwicklung von optimalen Fahr- und Regelungskonzepten zur Reduktion der Schadstoffemissionen über den gesamten Betriebsbereich
- Entwicklung neuer numerischer Auslegungsprogramme und multidisziplinärer Optimierungsalgorithmen

### ■ ERGEBNISSE

Technologien für die Entwicklung und den Bau von GuD- und KWK-Kraftwerken mit einem Wirkungsgrad von 65 bzw. über 85 Prozent Primärenergieausnutzung, bei halbierten Anfahrzeiten (Kalt-, Warm- und Heißstart), halbierten Teillastverlusten, auf unter 20 Prozent absenkbarer emissionskonformer Teillast und gesteigerter Regelfähigkeit (Netzstabilisierung im Primär- und Sekundärbereich), ohne Kompromisse bei Lebensdauer und Unterhaltskosten eingehen zu müssen. Derartige, hervorragend auf die Anforderungen im zukünftigen europäischen Stromnetz, aber auch im Weltmarkt, ausgerichtete Kraftwerke können voraussichtlich bis 2030 ans Netz gehen. Außerdem sollen die technologischen Voraussetzungen geschaffen werden, die zulassen, den Wasserstoffanteil von heute < 10 bis auf 100 Prozent im Jahre 2030 zu steigern und somit eine energetisch günstige Rückverstromung aus Speichern erlauben.

### ■ ART DER FORSCHUNG

Angewandte Forschung, experimentelle und numerische Entwicklung in generischen und technologienahen Konfigurationen, Prototyp und Komponentenerprobung, Nutzung von Big Data



## AG 5 – 2. Technologieentwicklung für die Dampfturbine der Zukunft

Dampfturbinen haben im Rahmen der Energiewende eine wichtige Aufgabe, einerseits im Kombibetrieb in GuD- und KWK-Kraftwerken, andererseits in solarthermischen Anlagen und niederkalorischen Anlagen (zum Beispiel Biomasse) sowie bei industriellen Anwendungen.

Dampfturbinen eignen sich als rotierende Massen insbesondere zur Frequenzstützung des Netzes bei hohem Anteil von fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen. Im internationalen Fokus stehen ebenso höchsteffiziente Dampfturbinen für fossile Energieträger.

### ■ MOTIVATION

Dampfturbinen werden in einem sehr breiten Anwendungsspektrum eingesetzt und in stark zunehmendem Maß in einem weiten Lastbereich. Des Weiteren sind verstärkt große Leistungsdichten erforderlich. Diese Anforderungen an die Dampfturbinen sind durch die folgenden Schwerpunkte gekennzeichnet:

- Kompakte Bauweise zur Beschleunigung des Aufheiz- und Abkühlverhaltens von Gehäuse und Rotor
- Resonanzfester Betrieb bei transients Fahrweise und Betriebspunkten im tiefen Teillastbereich (zum Beispiel im Parkbetrieb)
- Erhöhung der Lebensdauer bei verringerter Degradation der Effizienz

### ■ FORSCHUNGSINHALTE

Um diesen Anforderungen im zukünftigen Energiesystem gerecht zu werden, ergeben sich folgende Forschungsinhalte:

- Technologien für robuste und effiziente Dampfturbinen-Schaufeln mit hoher Leistungsdichte, Betriebs- und Einsatzflexibilität, unter anderem verbesserte Modellierung der Anregung (Flutter) und Fluid-Struktur-Interaktion bei allen Lastzuständen, Vermeidung von Konservativitäten (zum Beispiel durch Probabilistik, multidisziplinäre Auslegungs- und Optimierungsmethoden), und verlässliche Bestimmung der (Rest-) Lebensdauer (Bruchmechanische Modelle, Monitoring)
- Erforschung neuer, wirtschaftlicher Dichtungskonzepte zur Minimierung von Leckage, Verschleiß und

Wärmeeintrag (Modellierung, Anstreiftoleranz, aktive Leckagekontrolle etc.)

- Optimierung des Turbineneinström- und -abströmdesigns für flexiblen Betrieb durch verbesserte Modellierung der instationären Effekte
- (Weiter-)Entwicklung von innovativen Werkstoffen und Fertigungskonzepten (zum Beispiel 3D-Druck, Gradientenwerkstoffe, Verbundwerkstoffe)
- Entwicklung neuer Berechnungsmodelle durch Einsatz neuer Technologien (zum Beispiel Künstliche Intelligenz, Machine Learning, Neuronale Netze, Digitalisierung)

### ■ ERGEBNISSE

Technologien für die Entwicklung, den Bau sowie die Ertüchtigung von GuD-, KWK-, Biomasse- und CSP-Kraftwerken mit höchstem Wirkungsgrad, bei halbierten Anfahrzeiten (Kalt-, Warm- und Heißstart), halbierten Teillastverlusten und gesteigerter Regelfähigkeit (Netzstabilisierung im Primär- und Sekundärbereich), ohne Kompromisse bei Lebensdauer und Unterhaltskosten eingehen zu müssen. Dies betrifft insbesondere lebensdauerlimitierende Komponenten. Die Erweiterung des Betriebsbereiches und die Erhöhung der Lebensdauer für transiente Betriebsarten sollen bei gleichzeitiger Erhöhung des Volllastwirkungsgrades möglich sein.

Die Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Entwicklung wettbewerbsfähiger Produkte soll zeitnah verifiziert und in etwa fünf Jahren nach Abschluss der Forschungstätigkeit realisiert sein.

### ■ ART DER FORSCHUNG

Angewandte Forschung, experimentelle und numerische Entwicklung in generischen und technologienahen Konfigurationen, Prototyp und Komponentenerprobung.

## AG 5 – 3. Hydraulische Turbomaschinen

Bedingt durch die Energiewende werden zukünftig nicht nur Turbinen in Dampf- und Gaskraftwerken flexibler betrieben werden müssen, sondern ebenfalls die Komponenten der hydraulischen Kreisläufe. Dies sind hydraulische Turbomaschinen (Kreispumpen) einschließlich deren Überwachungs- und Regelungssysteme. Neben der nationalen Aufgabe, die Energiewende zu ermöglichen, sind hydraulische Komponenten

der Kraftwerkstechnik auch für den internationalen Markt von hoher Bedeutung, da mittlerweile absehbar ist, dass viele Länder zukünftig ähnliche Randbedingungen in der Energieerzeugung haben werden.

### ■ MOTIVATION

Hydraulische Aggregate in Kraftwerken sind bislang nicht für einen lastflexiblen Betrieb optimiert. Speisewasserpumpen beispielsweise stellen allerdings in Dampfkraftwerken den größten Einzelposten am Eigenbedarf dar, durch welchen der Gesamtwirkungsgrad um fünf bis zehn Prozent verringert wird. Durch den zunehmend flexiblen Betrieb der Kraftwerke steigt deshalb der relative Verlust durch Eigenverbrauch weiter an. Es besteht daher Forschungs- und Entwicklungsbedarf für lastflexible hydraulische Aggregate mit hoher Effizienz im Teillastbereich.

### ■ FORSCHUNGSINHALTE

Aus der Flexibilisierung der hydraulischen Komponenten ergeben sich folgende Forschungsaufgaben:

Hydraulik:

- Vermeidung der Kennlinieninstabilität von Kreispumpenstufen, so dass der vollständige Arbeitsbereich von Null- bis Maximalförderung ausgenutzt werden kann
- Reduzierung der Druckpulsationen in einem weiten Arbeitsbereich
- Optimierung des Kavitationsverhaltens der ersten Stufe für extreme Teillast (NPSH-Stufe)

Struktur/Festigkeit:

- Strukturmechanische Optimierung der Deck- und Tragscheibengeometrie sowie Radien- und Filletübergänge im Hinblick auf reduzierte Materialbelastungen
- Anwendung neuer Gleitlagerkonzepte, zum Beispiel kohlefaserverstärkte, poröse Gleitlagerwerkstoffe, die eine vollständige Benetzung der Gleitlagerbuchse ermöglichen und zusätzlich resistent gegen Anschleifen sind.

Leckage-Strömungen:

- Entwicklung neuer Wabengeometrie für Spaltdichtungen zur Reduzierung der volumetrischen

Verluste und zur Dämpfung der Schwingungen im extremen Teillastbereich

- Entwicklung von Lagerungs- und Dichtungskonzepten für Kreispumpen in einem weiten Betriebsbereich

Monitoring:

- Entwicklung von mechatronischen Monitorverfahren zur Überwachung der Energieeffizienz
- Entwicklung von Modellen zur Schadensfrüherkennung und -prognose

### ■ ERGEBNISSE

Verbesserte hydraulische Komponenten und deren Regelungen, die in Zukunft insbesondere bei Teillastfahrweise der Kraftwerke eine Reduzierung des Energieeigenbedarfs ermöglichen, wodurch der Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerks über den Betriebsbereich optimiert wird.

### ■ ART DER FORSCHUNG

Angewandte Forschung, experimentelle und numerische Entwicklung in generischen und technologienahen Konfigurationen, Prototyp und Komponentenerprobung.

## AG 5 – 4. Dezentrale Energieumwandlung (Hochflexible Gasturbinen, Mikrogasturbinen, Gasmotoren)

Hochflexible Gasturbinen und Gasmotoren, auch GuD bzw. Kraft-/Wärmekopplung, sind besonders geeignet, die Anforderungen von dezentraler Energieumwandlung und zuverlässiger und effizienter Bereitstellung von Residuallast zu bedienen (siehe auch AG 1). Blockheizkraftwerke auf der Basis von Mikrogasturbinen und Gasmotoren können aufgrund ihrer großen Brennstoff- und Lastflexibilität sowie der gesellschaftlichen Akzeptanz einen wichtigen Beitrag für die zukünftige Energieversorgung leisten.

### ■ MOTIVATION

Typische Merkmale dieser Maschinen sind unter anderem kurze Anfahrzeiten, ein hoher Wirkungsgrad, insbesondere auch im Teillastbetrieb, hohe zulässige Lastgradienten und Brennstoffflexibilität. Bei modularer Bauweise kann ein weiterer Leistungsbereich realisiert werden. Durch ihre Flexibilität tragen sie wesentlich zur Stabilisierung der Stromnetze bei. Die dezentrale Einbindung in das Nieder- und Mittelspannungsnetz

reduziert den notwendigen Netzausbau und ermöglicht eine schnelle Umsetzung.

#### ■ FORSCHUNGSINHALTE

Systeme zur dezentralen Energieumwandlung sind im Verbund zur regenerativen Stromerzeugung, insbesondere durch Wind und Sonne, zu sehen. Viele Entwicklungsergebnisse aus dem Bereich der großen Gasturbinen sind auf die kleinen Maschinen übertragbar, darüber hinaus ergibt sich durch den speziellen Einsatz im niedrigen Leistungsbereich und bei hoher Zyklenzahl zusätzlicher Forschungsbedarf:

Hochflexible Gasturbine (< 50 MW) und Mikrogasturbine (1kW bis 1MW)

- Komponenten (teilweise aktiv gekühlt) mit hoher Thermowechselhaftigkeit
- stabile, schadstoffarme Verbrennungsprozesse über den gesamten Betriebsbereich bei gleichzeitiger Brennstoffflexibilität
- Reduzierung der Spaltverluste
- hocheffiziente Verdichter mit Robustheit gegenüber den Anforderungen bei extrem dynamischem Betrieb
- Zustandsüberwachung und Wartungsplanung unter den besonderen Bedingungen des dezentralen Einsatzes
- Effizienzsteigerung im extrem tiefen Teillastbereich, Verbesserung der Rekuperation, Steigerung der Lastwechselgeschwindigkeit
- Optimierte Komponenten in Integralbauweise (zum Beispiel Funktionsintegration, integrales Wärmemanagement) durch gezielte Nutzung des Potentials moderner Herstellungsverfahren (zum Beispiel additive Verfahren)
- Entwicklung für die Integration in neuartige Kraftwerkskonzepte

Gasmotoren für die Energiebereitstellung:

Während die Zielsetzungen in der Anwendung für die hochflexiblen Gasturbinen und Gasmotoren nahezu identisch sind, ergeben sich technische Herausforderungen wegen des Unterschiedes zwischen intermittierendem versus kontinuierlichem Betriebs mit separatem Forschungsbedarf:

- Entwicklung von emissionsreduzierten und effizienten Betriebskonzepten, insbesondere für die Rückverstromung synthetischer Brennstoffe und für die Nutzung regenerativer Brennstoffquellen
- Dynamische, interdisziplinäre Modellierung des Gesamtsystems Gasmotor mit Fokus auf die Komponenteninteraktion, insbesondere bei schnellen Lastwechseln
- Optimierte Hybrid-Kraftwerke

#### ■ ERGEBNISSE

Technologien für die Entwicklung und den Bau von dezentralen Kraftwerken mit höchster Flexibilität bei gleichzeitig hoher Effizienz und großer Leistungsbandbreite. In der Anwendung mit hochflexiblen Gasturbinen ist eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades über fünf Prozent, bei Mikrogasturbinen um bis zu zehn Prozent bis 2030 zu erwarten. Die Rückverstromung synthetischer Brennstoffe und die Nutzung regenerativer Brennstoffquellen sollen dabei auch im Lastfolgebetrieb effizient und schadstoffarm möglich sein.

#### ■ ART DER FORSCHUNG

Angewandte Forschung, experimentelle und numerische Entwicklung, inklusive Komponentenerprobung, Demonstrationsanlagen zur Bewertung neuer Kraftwerkskonzepte und neuer Komponenten.

### AG 5 – 5. Turbokomponenten für innovative Prozesse

Neben dem Einsatz der Turbomaschinen in hybriden Energieanlagen wie solar- und geothermischen Kraftwerken werden, unabhängig von der Notwendigkeit der Weiterentwicklung von Gas- und Dampfturbinen für den Einsatz in fossil befeuerten Kraftwerken, in der Zukunft verstärkt Turbomaschinen auch in neuartigen, innovativen Prozessen benötigt.

#### ■ MOTIVATION

Aufgrund der Notwendigkeit der im großen Maßstab zu realisierenden Speicherung von Energie aus Wind und Sonne und der Rückverstromung werden Turbomaschinen verstärkt in das Gesamtsystem „Power-to-X-to-Power“ eingebunden, wie etwa für die Abwärmenutzung oder die Verwendung neuer Arbeitsmedien (zum Beispiel ORC-Prozesse oder superkritisches CO<sub>2</sub>). Aus der Systemintegration heraus ergeben sich neue Herausforderungen und

Einsatzprofile, die im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten validiert werden müssen. Zudem sind Querschnittsthemen wie zum Beispiel Akustik und Schwingungen, die alle Arten von Turbomaschinen betreffen, zu adressieren.

#### ■ FORSCHUNGSINHALTE

- Optimierung von Dampf- und Gasturbinen für hybride Kraftwerke (CSP und Geothermie); Entwicklung von Turbomaschinen für Solarturm-Kraftwerke oder zur Kombination des Clausius- und Joule-Prozesses
- Entwicklung leistungsfähiger Verdichter- und Expanderstufen für die großskalige Druckluftspeicherung und Transport (zum Beispiel CO<sub>2</sub>)
- Neuartige Verdichtungs- und Expansionsaggregate für neue Arbeitsmedien (H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>), Entwicklung von Turbomaschinen für superkritische CO<sub>2</sub>-Zyklen
- Oxyfuehlurbinen und Turbokompressoren für die kryogene Luftzerlegung
- Werkstoffalterung und Stabilität der Arbeitsmedien in neuen Prozessumgebungen
- Anwendungen von Turbomaschinen für Mehrphasenströmungen einschließlich Phasenwechsel in der Maschine (gasförmig, flüssig, fest)
- Aufladung von Brennstoffzellen
- Abdichtungstechnologie von Turbomaschinen
- Entwicklung von Verdichtungs- und Expansionsmodulen für die regenerative Restwärmenutzung unter Berücksichtigung der Vorgaben aus innovativen Prozessen (zum Beispiel ORC, Kalina-Prozess, Gichtgasexpander)

#### ■ ERGEBNISSE

Die entwickelten Turbomaschinentechnologien bilden die Grundlage für die erfolgreiche Integration erneuerbare Energien und Speicherlösungen in einem künftigen Energiesystem. Es sollen Demonstratoren und wettbewerbsfähige Produkte bis zum Jahre 2030 bereitgestellt werden.

#### ■ ART DER FORSCHUNG

Angewandte Forschung, experimentelle und numerische Entwicklung in generischen und technologie-nahen Konfigurationen, Demonstratoren



## **Bildnachweis**

Titel: RWE AG (Bild links), Trautwein (Bild rechts), AG 1: [www.siemens.com/presse](http://www.siemens.com/presse), AG 2: CO<sub>2</sub>-Abscheidung: EST/TU Darmstadt, AG 3: DLR-cc.by 3.0, AG 4: BMWi/Maria Parussel, AG 5: [www.siemens.com/presse](http://www.siemens.com/presse)

