



**EXPERTENEMPFEHLUNG 2023
FORSCHUNGSNETZWERK
FLEXIBLE ENERGIEUMWANDLUNG**





FLEXIBLE ENERGIEUMWANDLUNG

FORSCHUNGSNETZWERKE
ENERGIE

Impressum

Herausgeber

Projekträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Redaktion und verantwortlich für den Inhalt

Forschungsnetzwerk Flexible Energieumwandlung

Gestaltung und Produktion

Projekträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Stand

März 2023

Bildnachweise:

Titel: ©Andrei Merkulov – stock.adobe.com

Seite 3: ©EST/Graf/Kaltenmorgen

Seite 4: ©EST/Kaltenmorgen/Bonk

Seite 9, 11: ©MAN Energy Solutions SE

Seite 13, 14: ©DLR (CC BY-NC-ND 3.0)

Seite 17: ©Siemens Energy

Seite 18: ©MAN Energy Solutions

Seite 21: ©GRIDSOL project (gridsolproject.eu)



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INHALT

1.	Einleitung	3	
2.	Kraftwerke, Konversionstechnologien und stoffliche Speicher (AG1)	4	
3.	CO ₂ -Technologie und -Integration (AG2)	9	
4.	Solarthermische Kraftwerke und thermische Speicher (AG3)	13	
5.	Turbomaschinen (AG4)	17	
6.	Zusammenfassung	21	

1. EINLEITUNG

Das Forschungsnetzwerk Flexible Energieumwandlung besteht aus vier AGs, die sich thematisch ergänzen:

AG 1 – Kraftwerke, Konversionstechnologien und stoffliche Speicher

AG 2 – CO₂-Technologien und -Integration

AG 3 – Solarthermische Kraftwerke und thermische Speicher

AG 4 – Turbomaschinen

Zusammen decken die vier Arbeitsgruppen sämtliche Forschungsbereiche ab, die für ein flexibles Bereitstellen von Strom, Wärme und chemischen Energieträgern benötigt werden.

Im Forschungsnetzwerk sind 300 Mitglieder aus Forschungseinrichtungen und Hochschulen, Industrieunternehmen und Verbänden sowie weiteren Institutionen aktiv (Stand Januar 2023).

Konventionelle Kraftwerke als Rückgrat der Energieversorgung

Konventionelle Kraftwerke nehmen auf dem Weg zu einer rein auf regenerativen Energieträgern fußenden Energieversorgung wichtige Funktionen wahr. Zum einen sorgen sie mit verschiedenen Systemdienstleistungen dafür, die Netze stabil zu halten. Zum anderen können Kraftwerke im Teil- oder Vollastbetrieb fahren und damit die Stromproduktion der regenerativen Energieträger wie Wind oder Sonne bei Bedarf unterstützen. So wird gewährleistet, dass die von der Industrie sowie den Verbraucherinnen und Verbrauchern benötigte

Energie immer in entsprechender Menge zur Verfügung steht. Dies sollte zudem zu gesellschaftlich akzeptablen Kosten ermöglicht werden.

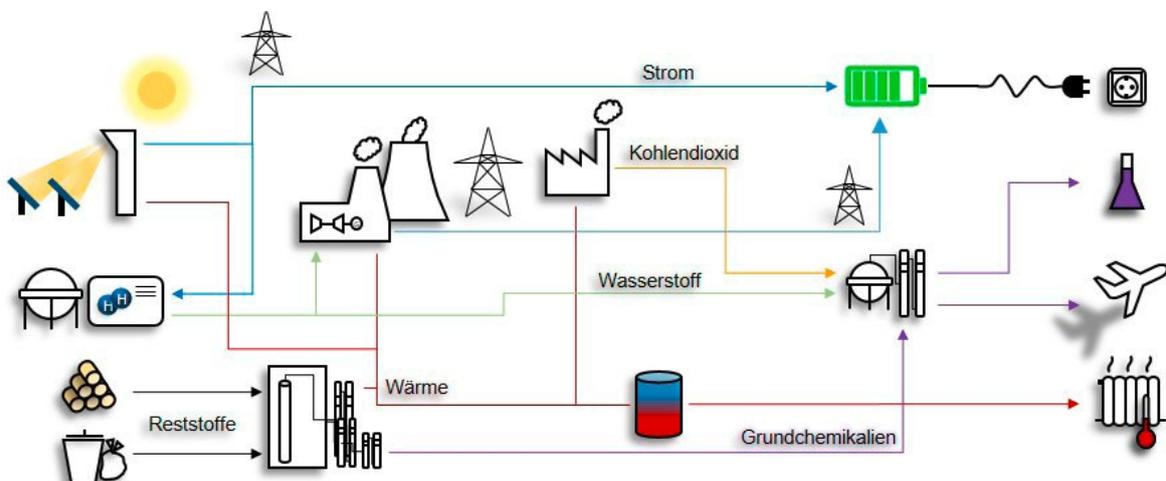
Transformation zu einem klimaneutralen Energiesystem

Mit der Transformation des Energiesektors wird unter anderem das Ziel verfolgt, die konventionellen Kraftwerke so CO₂-arm wie möglich zu betreiben. Hierbei können alternative Brennstoffe wie Wasserstoff oder innovative Technologien zum Abtrennen und Nutzen von CO₂ sowie der Gebrauch von solar erzeugter Hochtemperaturwärme einen wertvollen Beitrag leisten. Mit Hilfe leistungsstarker Speicher lassen sich Bereitstellung und Verbrauch von Energie zeitlich entkoppeln.

Turbomaschinen bilden zusammen mit thermischen oder chemischen Energiespeichern die Grundlage für die verschiedensten Speicherkreisläufe. Sie werden zudem benötigt, um den Energiesektor mit dem Wärme- und Transportsektor zu koppeln (Stichwort: Power-to-X) und diese gleichzeitig zu defossilisieren.

Forschung als Innovationsmotor der Energiewende

In den folgenden Kapiteln werden die aus Sicht des Forschungsnetzwerks notwendigen Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte zu den netzwerkrelevanten Themen gelistet. Die Arbeiten sind in enger Kooperation von Wissenschaft und Industrie sowie ggf. weiteren Beteiligten durchzuführen. Durch entsprechende förderpolitische Rahmenbedingungen kann gewährleistet werden, dass deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen auch in Zukunft bei den aufgeführten Technologien, Prozessen und Dienstleistungen eine Vorreiterrolle einnehmen werden.



Graphische Darstellung der Forschungsschwerpunkte des Forschungsnetzwerks.

2. KRAFTWERKE, KONVERSIONSTECHNOLOGIEN UND STOFFLICHE SPEICHER (AG1)

Motivation

Deutschland nimmt in vielen Kraftwerksbereichen, industriell wie wissenschaftlich, eine technologisch führende Position ein. F&E-Ergebnisse aus der Verbundforschung leisten einen wichtigen Beitrag für den zukünftigen Exporterfolg und für die regional unterschiedlich ausgestalteten Energiewenden weltweit. Viele thermische Kraftwerke, heute noch überwiegend mit fossilen Brennstoffen betrieben, lassen sich auf erneuerbare Energieträger umstellen. Sie sind damit zukunftstauglich. Hinzu kommen Weiterentwicklungen, etwa neue Prozessvarianten und Hybridkonzepte (Integration erneuerbarer Energien und Energiespeicher) sowie Konzepte zur Sektorenkopplung, bedarfsseitig und durch Kopplung von energetischen und stofflichen Prozessen.

Mit zunehmendem Einsatz volatiler erneuerbarer Energien (Strom und Wärme) werden leistungsfähige, flexible und zuverlässige Back-up-Systeme und Systemketten bedeutsam. Diese leisten einen Beitrag, um über Bedarf produzierten Strom ökonomisch sinnvoll zu verwenden, indem beispielsweise der Strom gespeichert oder in chemische Energieträger umgewandelt wird. Dafür benötigte Anlagen werden aufgrund komplexer Strukturen und Betriebsanforderungen erst einmal groß sein und zentralen Charakter haben. Zukünftig ergibt sich jedoch aufgrund der Vielzahl an dezentralen Energieeinspeisungen auch die Notwendigkeit, die Speicher- oder Umwandlungsprozesse in kleinerem Maßstab effizient zu realisieren.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

1: Flexibilisierung, Effizienz und Verfügbarkeit bei zentralen und dezentralen Gas- und Dampfkraftwerken

Flexible und effiziente thermische Kraftwerke stellen auf absehbare Zeit die einzige wirtschaftlich und in ausreichendem Umfang verfügbare Flexibilitäts- und Kapazitätsoption dar, um die zunehmend volatile Stromspeisung aus erneuerbaren Quellen abzusichern.

Die politischen Richtungsentscheidungen und der damit verbundene Ausbau der Erneuerbare-Energien-Anlagen haben bereits heute die Einsatzweise der thermischen Kraftwerksflotte geändert. Diese muss schnelle Lastwechsel, häufiges An- und Abfahren und tiefe Teillasten sowie längere Stillstandzeiten erfolgreich bewältigen.



Die 1 MW-Modulare-Pilotanlage der TU Darmstadt zum Erproben thermischer Wirbelschichtverfahren.

Daher besteht F&E-Bedarf auf Komponenten-, Prozess- und Anlagenebene und bei der Ausgestaltung innovativer Energiesysteme. Ziel ist es, durch F&E die Betriebsflexibilität, Effizienz und Leistungsfähigkeit der Anlagen zu erhöhen – und zwar mit Blick auf Neubauvorhaben und die Nachrüstung von Bestandsanlagen. Hierbei handelt es sich um angewandte Forschung, die von der Methodenentwicklung, Modellbildung und Simulation über Testanlagen bis hin zur Realisierung von Pilot- und Demoanlagen reichen kann. Als wesentliche Forschungsschwerpunkte werden gesehen:

- Verbesserung der Flexibilitäts- und Effizienzparameter, technisch-wirtschaftliche Optimierung
- Verbesserung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Anlagen und Komponenten
- Konzepte zur Integration zusätzlicher und vorhandener Energiespeicher in den Kraftwerksprozess (Wärmespeicher im Dampfkreis oder Rauchgaspfad)
- Entwicklung neuer Kreisprozesse, Integration thermischer und erneuerbarer Prozesse, Strom-Wärme-Strom-Systeme
- Systeme für den optimierten Einsatz und Betrieb größerer Kollektive aus zentralen und dezentralen Erzeugungseinheiten („virtuelle Kraftwerke“)
- Entwicklung kompakter, dezentral einsetzbarer (ggf. auch mobiler) Speicherkraftwerke
- Systeme zur Bereitstellung von Regelleistung

2: Brennstoffflexibilität

Die Auswahl des Brennstoffs – sowohl dessen Aufbereitung und Verbrennung am Anfang der Prozesskette als auch die Emissionsminderungsmaßnahmen während und nach der Verbrennung – haben einen entscheidenden Einfluss auf Anlagenbetrieb, Wirtschaftlichkeit sowie Klima- und Umweltbilanz thermischer Kraftwerke.

Für die Auswahl geeigneter, günstiger und verfügbarer Brennstoffe sind umfassende Brennstoffcharakterisierungen und Kenntnisse über brennstoffabhängige Verschmutzungen der Anlagen erforderlich. Dies gilt insbesondere bei der (Mit-)Verbrennung von CO₂-neutralen Energierohstoffen oder Reststoffen.

Konkret müssen Brennstoffdaten für den Einsatz in Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen gewonnen werden. Dazu gehören Erkenntnisse zu den Auswirkungen der Brennstoffe auf den Betriebsablauf, Modelle zum Vorhersagen des Betriebsverhaltens und zu den Emissionen. Technologien und Verfahren müssen dementsprechend angepasst, ggf. entwickelt und erprobt werden. Dies beinhaltet Versuche in Labor- und Pilot-/Demonstrationsanlagen sowie Messkampagnen in Kraftwerken. Ziel muss es sein, Handlungsempfehlungen für Kraftwerksbetreiber zu gewinnen.

Vor diesem Hintergrund sollten die nachfolgenden F&E-Schwerpunkte im Fokus stehen:

- Analyse der Auswirkungen verschiedener Brennstoffe auf den Anlagenbetrieb (Effizienz, Verschmutzung, Korrosion, Emissionen), Prozessoptimierung
- Aufbereitung von Biomasse, Abfällen und Ersatzbrennstoffen
- Entwicklung von Monoverbrennungsanlagen für Klärschlamm mit Phosphorrückgewinnung
- Vermeidung von Korrosion und Verschmutzung beim Einsatz von Sekundärbrennstoffen
- Sichere und emissionsarme Verbrennung von Wasserstoff und anderen CO₂-neutralen Brennstoffen
- Erprobung neuartiger Brennstoffe (wie z. B. regenerierfähiges Eisenpulver, e-Ammoniak) in Direktverbrennung

- Analyse der Auswirkungen beim Einsatz von Reststoffen (z. B. veränderte Eigenschaften von Flugasche durch Biomasse)
- Nutzung ionisierender Reststrahlung aus Bestandteilen abgebrannter Brennelemente in thermischen Generatoren und bei der Wasserstoffgenerierung

3: Emissionsminderung

Strengere Emissionsrichtlinien in Europa und weltweit erfordern neue innovative Technologien und Verfahren. Mit diesen lassen sich Kohlendioxid- und Schadstoffemissionen weiter minimieren und eine möglichst saubere Residuallast zur Versorgungssicherheit bereitstellen. Für Kraftwerke sind verschärfte Emissionsgrenzwerte (z. B. für Quecksilber und Stickoxide) zu erwarten. Daher müssen entsprechende verfahrenstechnische Maßnahmen und Anlagenmodifikationen zur Einhaltung dieser Grenzwerte getroffen werden.

Das Ziel ist es, Methoden zur verlässlichen Messung von Emissionen, Modelle zur Vorhersage des Betriebsverhaltens und der Emissionen bereitzustellen sowie Handlungsempfehlungen für Kraftwerksbetreiber hinsichtlich optimierten Einsatzes von Brennstoffen und der Vermeidung von Emissionen zu geben und etwaige erforderliche Technologien bzw. Verfahren zu entwickeln und erproben. Es geht dabei um Versuche im Labor und an Pilot-/Demonstrationsanlagen, Modellbildung und Simulation sowie um Messkampagnen in Kraftwerken.

Daraus ergeben sich folgende F&E-Schwerpunkte:

- Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Limitierung der Emissionen (insbesondere Quecksilber, Stickoxid, Schwefeloxid)
- Entwicklung von Online-Messtechnik für die Automatisierung und Optimierung von Kraftwerksfeuerungen, Vermeidung von Korrosionsschäden
- Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Limitierung der NO_x- und Ammoniak-Emissionen beim Einsatz von e-Ammoniak

4: Stromkonversion – Chemische Speicher und Sektorenkopplung

Der Ausbau der Erneuerbare-Energien-Anlagen verstärkt die Diskrepanz zwischen installierter und erforderlicher Kapazität.

derlicher Leistung. Um nicht benötigten Strom effektiv zu nutzen, kann dieser zwischengespeichert oder in elektrische oder chemische Energie oder Wärme umgewandelt werden.

Die Einkopplung von Elektroenergie zur Stoffwandlung erfordert flexible und wirtschaftliche Prozesse, die stabil speicherbare Produkte liefern, zentral wie dezentral. Dies betrifft Anwendungen in der chemischen Industrie und Petrochemie, der Metallurgie und der Recyclingwirtschaft. Zu untersuchen ist die damit mögliche CO₂-freie Wärmebereitstellung sowie chemische Effekte infolge der geänderten Prozesse. Dies beinhaltet neben technischen Aspekten auch die Technikbewertung und Technikfolgenabschätzung der gesamten Prozessketten und schließt technische Demonstrationen mit ein.

Als wesentliche Forschungsschwerpunkte werden daher erachtet:

- Prozesskettenanalyse, optimale Wege und Speichermedien, Rückverstromung (Methan, Methanol, Ammoniak, Metalle etc.)
- Reaktoren zur Einkopplung von Elektroenergie in Stoffwandlungsprozesse (Plasma, Mikrowellen)
- Anwendungen zur Elektroenergie-Einkopplung in Chemie, Metallurgie und Recyclingwirtschaft
- Flexible Stoffwandlungsprozesse zur Ein- und Auskopplung von Elektroenergie für zentrale und dezentrale Konzepte
- Sozioökologische und wirtschaftliche Analyse der Integration chemischer Speicher sowie der Integration strombasierter Prozesse

5: Thermochemische Konversion zur Kreislauf-Nutzung von Kohlenstoffen

Ziel ist es, durch innovative Technologien Kohlenstoffkreisläufe zu schließen, vorrangig für heimische Kohlenstoffquellen. Dies unterstützt den Strukturwandel in den Braunkohleregionen und trägt zur Lösung des Kreislaufproblems für Kunststoffe bzw. andere organische Verbindungen, für Müll, Bioabfälle und Klärschlämme bei. Zudem eröffnen sich durch geschlossene Kreisläufe neue Möglichkeiten, wie der gewonnene Wertstoff Kohlenstoff in vor-

handene Infrastrukturen verschiedener Sektoren eingebunden werden kann.

Es gilt, durch F&E Technologie-Kenntnisse und neue Lösungen zur stofflichen Kohlenstoffnutzung im Bereich Prozesse, Reaktoren und Materialien abzusichern. Dies soll zur Skalierung und Markteinführung im industriellen Maßstab befähigen und politische Handlungsempfehlungen ermöglichen. Die interdisziplinäre Forschung erstreckt sich von den Grundlagen bis zur Anwendung im Demonstrationsmaßstab. Dies beinhaltet Systembetrachtungen sowie experimentelle und modellgestützte Verifizierung der Technologien, Begleitforschung zu Demonstrationsprojekten sowie sozioökonomische Betrachtungen und Akzeptanzfragen. Konkreter Forschungsbedarf besteht zu folgenden Themen:

- Bewertung und Demonstration direkter stofflicher Nutzungspfade und Kreisläufe
- Bewertung und Demonstration effizienter Sektorenkopplung (Chemie, Abfall & Energie)
- Erstellung von lebenszyklusbasierten Kosten-, Energie-, Emissions- und Stoffbilanzen
- Konzeptentwicklung für zentrale (Industriestandorte) und dezentrale (kommunale) Anlagen
- Analyse sozialer Akzeptanz und Erarbeiten der Anforderungen an politische Rahmenbedingungen
- Hochtemperaturbeständige Werkstoffe und Fügeverfahren für reduzierende Atmosphären
- Prozesse der Aufbereitung und Einspeisung heterogener Einsatzstoffe
- 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, neben CO₂
- Synthesen mit Einkopplung grünen Wasserstoffs
- Chemische Reaktoren und Katalysatoren für CO₂-tolerante Synthesen

- Prozesse zur Umwandlung von gasförmigen Ausgangsstoffen zu flüssigen Kraftstoffen (X-t-L) sowie zur Umwandlung von gasförmigen Ausgangsstoffen zu Chemikalien (X-t-Chem), insbesondere deren Flexibilisierung
- Nutzungskonzepte für Problem-Reststoffe (Kohlefaser, Verbundkunststoffe, Schredder-Leichtgut etc.)
- Stoffcharakterisierung von Kohlenstoffquellen („Carbothek“) und Wertstoffrückgewinnung

6: Chemische Energiespeicher

Der steigende Anteil von Strom aus Erneuerbare-Energien-Anlagen sowie saisonal und zeitlich unterschiedliche Bedarfe an Strom und Wärme erfordern Speichermöglichkeiten. Neben Kurzzeitspeichern per Batterie oder Wärmespeichern ist die Langzeitspeicherung die größte Herausforderung. Diese lässt sich am besten mit stofflichen Speichern realisieren und in Energiesysteme integrieren.

Ziel ist es, neue Konzepte und Lösungen für die kosteneffiziente Speicherung von Energie in einem systemischen Umfeld zu entwickeln und gesicherte Erkenntnisse darüber zu gewinnen. Für die Skalierung und industrielle Implementierung müssen politische Handlungsempfehlungen aus wirtschaftlich sinnvollen und rechtlich gangbaren Wegen abgeleitet werden.

Die interdisziplinäre Forschung erstreckt sich von den Grundlagen bis zur Anwendung im Demonstrationsmaßstab. Dies beinhaltet Systembetrachtungen, experimentelle Verifizierung, sozioökonomische Fragen und Akzeptanzforschung.

Forschungsbedarf ergibt sich somit für:

- Potenzial- und Infrastrukturanalysen sowie Konzepte zur Speicherintegration für Industrieprozesse, Kraftwerkstechnik und Wärmenetze
- Speicherentwicklung zum Bereitstellen von Systemdienstleistungen
- Speicher- und Kraftwerkskapazitäten, um grüne Gase dauerhaft generieren zu können
- Großspeicher als Multi-Use-Speicher mittels chemisch-stofflicher Speicherung

- Synergetische Stoffstrom-Kreislaufkonzepte
- KWK der Wasserstofftechnologien für thermische Generatoren
- Sektorenkopplung: Konzepte zur Laststeuerung und Flexibilisierung
- Zukünftige Betriebs- und Geschäftsmodelle

7: Systemintegration

Mit dem Wandel von einer regelbaren, größtenteils fossilen, hin zu einer fluktuierenden, auf erneuerbaren Energieträgern basierenden Stromerzeugung sind kosteneffiziente Maßnahmen zu Versorgungssicherheit und sicherem Netzbetrieb zu ergreifen. Dies geschieht über Systemdienstleistungen.

Das Spannungsfeld zwischen Versorgungssicherheit und Klimazielen wird sich weiter verschärfen. Um beides sicherzustellen, müssen in absehbarer Zeit technische und ökonomische Anpassungen vorgenommen werden. Zentrale Großkraftwerke sind durch dezentrale und modulare Kraftwerksanlagen mittlerer Leistungsklasse zu ergänzen. Neben der Versorgungssicherheit spielt auch die Begrenzung der Folgekosten (Abregelung, Redispatch, Netzausbau) eine Rolle.

Ziel ist es, eine kosteneffiziente Kapazitätsreserve und Regelleistung für ein Stromversorgungssystem mit einem hohen Anteil an regenerativen Energiequellen vorzuhalten. Dazu können technoökonomische Evaluation, analytische Methoden und Simulation (Schnittstelle zwischen Anlagentechnik und Stromnetz) beitragen.

Forschungsbedarf besteht zu folgenden Themen:

- Technoökonomische Studien und dynamische Simulationsmodelle im Kontext eines europäischen, emissionsarmen Stromversorgungssystems, Vorschläge für die Anpassung des Ausschreibungsverfahrens für Regelenergie auf Basis einer Verifikation von bereits umgesetzten Maßnahmen
- Validierung notwendiger Kapazitäten für Netzstabilität und -reserve aus Netzstabilitätsanlagen, Bewertung verschiedener Anlagenkonzepte im Hinblick auf technische und wirtschaftliche Eignung
- Optimierung geeigneter Standorte für Systemdienstleistungen

- Zweckdienliche Revisionen gesetzlicher Regelungen auf EU-, Bundes- und Landesebene für modellhafte Umsetzungen von Erweiterungen
- Netzdienliche Integration und Betrieb von Elektrolyseuren

8: Digitalisierung

Für Kraftwerke erschließen sich durch Digitalisierung und Lebenszyklusoptimierung neue Möglichkeiten.

Hochflexible Fahrweisen bei reduzierten Einsatzzeiten, wie sie seit dem verstärkten Einspeisen von volatilem Strom erforderlich sind, führen bei thermischen Kraftwerken jedoch zu stärker belasteten Komponenten und Materialien. Zudem steigen die Anforderungen an Automatisierung und die Präzision von Vorhersagen. Daher ist es das Ziel, innovative digitale Lösungen für den Einsatz in thermischen Kraftwerken zu entwickeln, um diese digital „fit“ für kommende Herausforderungen der Energiewende zu machen. Angewandte und interdisziplinäre Forschungsaktivitäten sind gefragt, die in geeignete Pilotprojekte und Demonstrationen münden.

Vor diesem Hintergrund sind folgende F&E-Schwerpunkten erforderlich:

- Intelligente Sensorik, Datenübertragung und -validierung, Zusammenführen großer Datenmengen unterschiedlicher Strukturen
- Digitale Kopien von Anlagen (digital twins)
- Automatisierungskonzepte
- „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
- Betriebskonzepte für reduzierte Einsatzzeiten
- Neue Bauteilstrukturen und Auslegungsmöglichkeiten durch digitale Fertigungsprozesse

- IT-Sicherheit für thermische Kraftwerke sowie Datenmanagement (cyber security)
- Zertifizierung grüner Energieströme: durchgehende digitale Lösungen inkl. durchgehender Herkunftsnachweise und CO₂-Fußabdrücke.

Fazit

Der volatile Einsatz erneuerbarer Energien erfordert flexible Konzepte, u. a. durch Kopplung energetischer und stofflicher Prozesse (Polygeneration), Speichermöglichkeiten sowie Sektorenkopplung.

Konventionelle und neuartige thermische Kraftwerke werden zur Versorgungssicherheit gebraucht. Herausforderungen sind die gewünschte steigende Flexibilität und Wirtschaftlichkeit bei geringen Einsatzzeiten.

Speichertechnologien gewinnen an Bedeutung. Für Kurzzeitanwendungen bieten sich thermische Speicherkonzepte (wie z. B. Speicherkraftwerke/Carnot-Batterien, Power-to-Heat auf der Grenze zwischen Strom- und Wärme) an. Für Langzeitanwendungen sind (thermo-)chemische Speicher, mit der Möglichkeit der Rückverstromung, und saisonale Wärmespeicher vorteilhaft.

Die Energieinfrastruktur muss aufgrund veränderter Energieflüsse angepasst werden. Gegenwärtigen und zukünftigen Großspeichern sowie Kraftwerken kommt kurz- und mittelfristig eine zentrale Rolle im Energiesystem zu. Dies gilt insbesondere für die Kopplung von elektrischen und stofflichen (z. B. H₂) Leitungs- und Speichersystemen.

3. CO₂-TECHNOLOGIE UND -INTEGRATION (AG2)

Motivation

Die Reduktion von CO₂-Emissionen ist ein zentrales Ziel der Energiepolitik. Diese kann teilweise durch modifizierte technische Prozesse erfolgen. Bei einigen Produktionsprozessen (z. B. von Stahl, Zement etc.) lassen sich Kohlendioxid-Emissionen bislang jedoch kaum oder gar nicht vermeiden. Allerdings existieren technische Lösungen, um das CO₂ aus diesen Prozessen abzuscheiden. Dies konnte in Demonstrationsanlagen in jüngerer Vergangenheit erfolgreich gezeigt werden. Diese Technologien sind weiter zu entwickeln.

CO₂ wird bereits als Arbeitsmedium in unterschiedlichen Prozessen (z. B. Kühlaggregaten) genutzt. In alternativen Kraftwerks- und Energiespeicher-Prozessen kann CO₂ als Arbeitsmedium eingesetzt werden, was deutlich kompaktere Anlagen ermöglicht. Dazu ist die bekannte Technologie an das neue Medium anzupassen und entsprechend weiter zu entwickeln.



Wärmepumpen-Prüfstand von MAN Energy Solutions.

Neben der Möglichkeit, Kohlendioxid als Arbeitsmedium zu nutzen, lässt sich CO₂ auch zu Kraft- und Brennstoffen oder Chemikalien weiterverarbeiten. Gemeinsam mit Wasserstoff wird CO₂ daher anstelle von Öl, Gas oder Kohle ein wichtiger Rohstoff der zukünftigen Energie-Infrastruktur und für die Chemie-Industrie sein. Durch die Nutzung von CO₂ als Rohstoff ergeben sich zudem Möglichkeiten – durch Zwischenspeicherung von H₂ und CO₂ – Energie über kürzere oder längere Zeiträume zu speichern.

Für abgetrenntes CO₂, das nicht als Rohstoff weiterverwertet werden kann und dauerhaft gespeichert werden soll, sind entsprechende Infrastrukturen zu entwickeln und aufzubauen. Die bisherigen Forschun-

gen und Analysen auf diesem Gebiet hatten den Bedarf von Großkraftwerken berücksichtigt. Im Energiemarkt der Zukunft wandeln sich die Anforderungen: Es gilt, dezentrale Speicher- bzw. Zwischenspeicheroptionen zu entwickeln. Vor allem für große industrielle CO₂-Emittenten kann es sinnvoll sein, unterschiedliche Systeme zu nutzen.

Bei der direkten Speicherung in unterirdischen Lagerstätten wird eine nachhaltige Nutzung von Böden und Ressourcen entscheidend sein, um zusätzliche Umwelt- und Akzeptanzprobleme in der Gesellschaft zu vermeiden.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Die Forschung zu Kohlendioxid sollte sich auf die Weiterentwicklung der Technologien noch unterschiedlichen Reifegrades in den Marktsegmenten Abtrennung, Transport und Nutzung konzentrieren. Dabei liegen die Schwerpunkte auf folgenden Themen:

Abtrennung:

- Abscheidung aus Punktquellen
- DAC (Direct Air Capture) – Abscheidung aus der Luft

Transport:

- Leitungsgebunden/Speicherbehälter

Nutzung:

- Anwendungen – CO₂ als Arbeitsmedium
- Nutzung – Power-to-X-Technologien
- Injektion/Speicherung

1: CO₂-Abscheidung

Ziel ist die Kohlendioxidreduktion bei Industrieprozessen, bei denen CO₂-Emissionen nicht vermeidbar sind. Es sollten skalierbare technologische Prozesse und wirtschaftliche Konzepte zu branchenspezifischen CO₂-Abscheidungen in Abhängigkeit von politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen erarbeitet werden.

Dabei liegen die Schwerpunkte auf folgenden Themen:

- Anpassung und Skalierung von Abscheideanlagen für industrielle Quellen (z. B. BHKW bzw. stationäre Motoren und Turbinen, Produktionsprozesse in der Industrie etc.)
- Weiterentwicklung der bekannten Abscheidetechniken mit dem Ziel, den Energiebedarf und die Investitions- bzw. Betriebskosten zu senken
- Reduktion der unerwünschten Betriebsverschlechterung (Output-Verringerung, Einschränkungen der Flexibilität der Betriebsweise) des Hauptprozesses durch Carbon Capture, z. B. im Kraftwerksprozess oder bei der Zementproduktion)
- Analyse der etablierten Abscheidetechnologien für industrielle Emittenten (Ökonomie, Umweltauswirkungen)
- Entwicklung neuartiger Abscheidetechnologien für industrielle Emittenten unter Einbeziehung der jeweiligen energetischen und stofflichen Ressourcennutzung
- Betriebskonzepte zur Flexibilisierung der CO₂-Abscheidung
- Charakterisierung der erforderlichen Kennwerte für abgeschiedene CO₂-Ströme mit Blick auf die künftigen CO₂-Verwertungsoptionen
- Realisierung von Demonstrationsanlagen und in der Folge Anlagen in industriellem Maßstab
- Umfassende Bewertung der ökonomischen Aspekte und der Umweltauswirkungen
- CO₂-Abscheidung bei Konversion von Biomasse und Abfallstoffen
- Material-Entwicklungen (z. B. bei Membran-Technologien, Absorbermaterialien etc.)

2: DAC – Direct Air Capture

Um den globalen Temperaturanstieg auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen, sollten negative CO₂-Emissionen mittels DAC und CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage)-Technologien erzielt werden, auch wenn diese Technologien gegenwärtig noch sehr energie-

intensiv sind. Dabei sollte das CO₂ möglichst effizient in Großanlagen nahe am Ort der Einspeicherung bzw. Weiterverarbeitung ohne aufwändige Transportlogistik abgetrennt werden.

Die Forschungsschwerpunkte liegen auf folgenden Themen:

- Absorptions- und Adsorbermaterialien: Verringerung der erforderlichen Desorptions-Enthalpien und -Temperaturen sowie Erhöhung der spezifischen CO₂-Aufnahmekapazitäten; Erhöhung der Lebensdauer (O₂-Anteile im Gas können problematisch sein)
- Prozessauslegungen, insbesondere die Einkopplung von unterschiedlichen niederkalorischen Wärmequellen. Prozessgestaltung für Mega-Tonnen/Jahr-Anlagengrößen. Hierfür ist ein großer Scale-Up nötig
- Einbindung regenerativer Energiequellen in die Prozesse
- Prozesssteuerung
- Energieeffizienz-Optimierung
- Ökonomische vergleichende Betrachtungen der unterschiedlichen Technologien
- Standort-Auswahl: Komplexe Zusammenhänge zur sinnvollen CO₂-Weiternutzung/-Speicherung erfassen
- Aufbau von Demonstrationsanlagen und in der Folge von Anlagen in industriellem Maßstab

3: CO₂-Transport

Für die politisch gewünschte Sektorenkopplung ist der Aufbau einer CO₂-Infrastruktur unerlässlich. Betriebskonzepte und Flexibilitäten sind zu entwickeln und für die verschiedenen Einsatzbereiche entsprechende Werkstoffvorschläge zu erarbeiten. Der Fokus liegt auf:

- Entwicklung von CO₂-Zwischenspeichern zur Flexibilisierung
- Auswirkungen auf die Umwelt (Schlupf) – Gesellschaftliche Akzeptanz

- Umwidmung bestehender Infrastruktur (z. B. der Erdgas-Infrastruktur)
- Normung von CO₂-Infrastruktur zur Qualitätsabsicherung in Anlehnung an andere EU- und internationale Regelwerke.



Montage eines CO₂-Verdichters.

4: CO₂-Anwendungen

CO₂ bietet als Arbeitsmedium einige Vorteile. Als superkritisches CO₂ kann es zum Beispiel in alternativen Kraftwerks- bzw. ORC-Prozessen sowie in Kühlaggregaten und Klimaanlage eingesetzt werden. Dieses dynamisch wachsende Technologiefeld bietet Potenzial zu deutlich kompakteren und sehr flexiblen Anlagen. Für die verschiedenen Anwendungsfelder sollen technologische und wirtschaftliche Anforderungen erarbeitet werden. Dazu gehören:

- Umgang mit CO₂ hinsichtlich Korrosion mit entsprechenden Werkstoff-Entwicklungen für relevante Druck- und Temperaturbereiche
- Erarbeiten der Anforderungen für die Entwicklung/Anpassung von notwendigen Turbomaschinen/Pumpen und deren Komponenten
- Entwicklung und Analyse von Wärme-Kreisläufen für potenzielle Anwendungsbereiche wie z. B. CSP (Concentrated Solar Power) und WHR (Waste Heat Recovery)
- CO₂ als Wärmeträgermedium in Erdwärmesonden und geothermischen Anwendungen

5: CO₂-Nutzung – Power-to-X-Technologien

Nachhaltig erzeugter H₂ oder andere Stoffe können abgetrenntes CO₂ zu Kraft- und Brennstoffen bzw. zu Grundchemikalien umwandeln. Dadurch wird der Bedarf an fossilen, kohlenstoffhaltigen Rohstoffen (Kohle, Gas, Öl) perspektivisch massiv gesenkt. Diese Umwandlungsoptionen eröffnen prinzipiell Möglichkeiten, über CO₂ Energie (zwischen) zu speichern. Die entsprechenden Verfahren bzw. Technologien sollen weiterentwickelt und zur großtechnischen Einsatzreife geführt werden.

Der Forschungsfokus liegt dabei auf folgenden Schwerpunkten:

- Robuste Verfahren mit hoher Flexibilität zur Umwandlung von CO₂ in Treibstoffe und Grundchemikalien
- Neuartige Katalysatoren und Reaktoren, Verfahren, chemische Energiespeicher für flexible Power-to-X-Prozesse
- Direkte elektrochemische CO₂-Umsetzungen zu C-haltigen, nutzbaren Stoffen
- Gasprozess-Konditionierung („Feedgas“)
- Energieeffiziente Verdichtung von CO₂ (z. B. elektrochemische Kompression, hocheffiziente Kompressoren)
- Reduktion des Eigenenergiebedarfs, der Investitions- und Betriebskosten der etablierten Verfahren unter Einbeziehung der branchenspezifischen Erfordernisse
- Realisierung von Demonstrationsanlagen im technisch relevanten Maßstab bis hin zur Demonstration einer CCU-Kette
- Umfassende Bewertung der ökonomischen Aspekte und der Umweltauswirkungen
- Prozess-Intensivierung
- System-Integration mit den weiteren Prozessschritten – ganzheitliche Betrachtungen – Interaktion mit erneuerbaren Energien

6: CO₂-Injektion/CO₂-Speicherung

Voraussetzung für eine vollständige CCUS-Infrastruktur ist die Möglichkeit, CO₂ im Boden oder Untergrund zu speichern. Dabei muss sowohl das permanente Speichern von CO₂, mit dem Ziel, die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zu mindern (Stichwort "Carbon Dioxide Removal"), als auch die lediglich vorübergehende Speicherung von CO₂ berücksichtigt werden. Langfristig wird CO₂ als Wertstoff betrachtet werden. CO₂-Speicher mutieren dann entsprechend zu Wertstoff-Lagern.

Bisherige Speicheroptionen berücksichtigten den Speicherbedarf von Großkraftwerken an Standorten auf dem Festland. Aufgrund des erwarteten steigenden CO₂-Speicherbedarfs von Seiten der Industrie könnten alternative Speicheroptionen für dezentrale kleinere Zwischenspeicher als auch für dauerhafte Speicher benötigt werden. Auf dem Festland wäre möglicherweise die Mineralisierung von CO₂ in Basalten oder basaltähnlichen Gesteinen eine Option. Auch das Bündeln und der Transport von CO₂ aus unterschiedlichen Quellen zum Speichern unterhalb des Meeresbodens ist eine aktuell propagierte Option. Dazu liegen derzeit allerdings noch keine geo- und sicherheitstechnischen Anforderungen vor.

Wird CO₂ durch geeignete Verfahren oberflächennah im Boden gespeichert, ist die nachhaltige Nutzung von Böden und Ressourcen entscheidend. So lassen sich transmediale Problemverlagerungen oder zusätzliche Umweltprobleme vermeiden. Umfassende und vergleichende Ökobilanzen sind für diese Klimaschutzoptionen noch nicht vorhanden.

Folgende Themen sollten untersucht werden, insbesondere mit Blick auf die Akzeptanz in der Bevölkerung:

- Anforderungen an die Speichersicherheit, insbesondere unverfestigte Gesteine in Deckgebirgen und Störungen
- Kriterien zur Standortuntersuchung, -bewertung und -auswahl
- Aufzeigen der Potenziale von Speichern für industrielle Emissionen und für DAC
- Anforderungen an CO₂-Ströme und CCUS-Netze
- Stoffstrom-Analysen

- Aufbau und Verwendung von unterirdischen Pufferspeichern
- Anforderungen an kleine dezentrale Speicher und alternative Speicherkonzepte (in Formationswässern gelöstes CO₂, kapillare Bindung in offenen Aquiferen)
- Offshore-Speicheroptionen
- Detektion und Nachweisgrenzen für CO₂ unter realen Umweltbedingungen (Pilot- und Demonstrationsprojekte)
- Erfassung der Eingangsgrößen für umfassende Ökobilanzen zu CCS und Bio-CCS Konzepten
- Mineralisierung von CO₂ im Untergrund – Standortanalysen

Fazit

Bei einigen industriellen Prozessen lässt sich die Entstehung von CO₂ nicht verhindern (z. B. bei der Zementproduktion). Zudem ist das Kohlenstoffatom für viele industrielle Produkte essenziell (z. B. für die chemische Industrie). Da zukünftig der Einsatz von fossilen Rohstoffen als Kohlenstoffquelle zu vermeiden ist, wird CO₂ zum Wertstoff. Dies macht eine CO₂-Infrastruktur für das Energiesystem der Zukunft notwendig.

CO₂-Quellen und CO₂-Senken sind miteinander zu verbinden, sodass eine sektorenübergreifende Nutzung beziehungsweise Speicherung möglich wird.

Nur unter diesen Bedingungen ist die langfristige Entwicklung von nachhaltigen Power-to-X-Technologien und weiteren Anwendungen sinnvoll.

4. SOLARTHERMISCHE KRAFTWERKE UND THERMISCHE SPEICHER (AG3)

Motivation

Konzentrierende Solarsysteme bieten insbesondere in sonnenreichen Regionen eine vielversprechende Option, Wärme und Strom kostengünstig und nach Bedarf bereitzustellen. Dies gelingt über die Integration von thermischen Energiespeichern. Die Wärme kann direkt in industriellen Prozessen eingesetzt oder in thermischen Kraftwerken in Strom umgewandelt werden, und zwar auch zu Zeiten, in denen die Sonne nicht scheint. Damit ergänzt diese Technologie die Produktion von Strom mittels Photovoltaik (PV) und Wind in effizienter Weise.



Testfeld des DLR in Jülich zur Erprobung modernster CSP-Technologie und Erforschung solarer Brennstoffe.

Wärmespeicher sind außerdem in anderen Anwendungen bedeutsam, z. B. bei der Strom-Wärme-Strom-Speicherung oder bei der flexiblen Nutzung industrieller Abwärme-Potenziale. In Kombination mit Power-to-Heat (direkte Elektrifizierung oder Hochtemperatur-Wärmepumpen) leisten sie zudem einen wichtigen Beitrag, um mittels Strom aus regenerativen Energiequellen Prozesswärme zu defossilisieren. Außerdem tragen Wärmespeicher zur Flexibilität des Stromsystems bei.

Lange Zeit ging man davon aus, dass die Anwendung konzentrierender Solarkollektoren in Mitteleuropa aufgrund zu geringer Direktstrahlung nicht sinnvoll ist. Kostensenkungen und Vergleiche unterschiedlicher Kollektoren haben aber gezeigt, dass die Technologie für industrielle Prozesswärme zwischen 80 und 400 Grad Celsius auch in Zentraleuropa einen kostengünstigen und effizienten grünen Deckungsbeitrag leisten kann.

Zudem wird Energie aus regenerativen Energiequellen benötigt, um chemische Energieträger wie Wasser-

stoff für ein defossilisiertes Energiesystem zu produzieren. Daher sollten die Potenziale konzentrierender Solarsysteme in Kombination mit thermischen Speichertechnologien künftig verstärkt in den Forschungsfokus gerückt werden.

Konzentrierende Solarsysteme sind heute im Wesentlichen in Form von Parabolrinnen verfügbar, haben aber noch erhebliches Weiterentwicklungspotenzial. Neue Technologien, besonders in Form von Turmsystemen, befinden sich in der Markteinführung. Im Bereich der Prozesswärme sind ebenfalls erste kommerzielle Systeme in Form von Parabolrinnen- und Fresnelsystemen verfügbar. Bei der Produktion chemischer Energieträger mittels solar hergestelltem Strom gibt es bislang lediglich Prototypen.

Wärmespeicher sind bereits als Feststoffspeicher und Speicher mit flüssigen Medien bis zu 600 Grad Celsius verfügbar. Neue Technologien, insbesondere in Form von modularen Speicherlösungen im einstelligen MW-Bereich, sind in der Markteinführung. Beide haben noch erhebliches Weiterentwicklungspotenzial. Speicherunterstützte Power-to-Heat (PtH)-Lösungen sind im Fernwärmebereich bereits erfolgreich ausgerollt. Eine Adaption auf Prozesswärme und Prozessdampf ist der logische nächste Schritt.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Um die Technologie für die drei Sektoren Strom, Wärme und Produktion chemischer Energieträger im Markt zu etablieren, besteht weiterer F&E-Bedarf. Innovationen sind erforderlich, um die Kosten bei gleichbleibend hoher Flexibilität und Zuverlässigkeit der Anlagen zu senken – und somit die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie zu sichern.

Dabei liegen die Schwerpunkte auf folgenden Themen:

- Entwicklung von Integrationskonzepten für solarthermische Kraftwerke und Wärmespeicher im Verbund mit anderen erneuerbaren Energiequellen
- Techno-ökonomische Effizienzsteigerung und Erhöhung der Zuverlässigkeit durch eine systematische technologische Weiterentwicklung der Schlüsselkomponenten von thermischen (Hochtemperatur-)Speichern und konzentrie-

render Systeme, ergänzt durch Studien zur ökologischen Auswirkung

- Anwendung von Digitalisierungstechnologien zur effizienten Zustandsüberwachung und Steuerung sowie vorausschauenden Wartung für einen effizienten und sicheren Betrieb
- Pränormative Forschung zur Vorbereitung von Standards, die die Qualität und Vergleichbarkeit von Komponenten, Systemen und Verfahren absichern
- Exploration von Konzepten zur Produktion von chemischen Energieträgern mittels konzentrierender Solarsysteme unter Einbindung von Strom und Wärme

1: Integration und Speicherung

Ziel ist der Zusammenschluss solarthermischer Kraftwerke (Concentrated Solar Power, CSP) und/oder Wärmespeicher mit anderen Erneuerbare-Energien-Technologien.

Dazu müssen Konzepte erarbeitet und mittels Prototypen und Pilotanlagen demonstriert werden. So lässt sich die erforderliche Hochskalierung vorbereiten und einleiten.

Konkrete Aufgaben umfassen:

- „Tiefe Integration“ von CSP, Speichern und PV-/Wind-Systemen unter Berücksichtigung neuer Schlüsselkomponenten wie Elektroerhitzer, Hybridkollektoren, Wärmepumpen und die Einbindung industrieller Abwärme
- Bedarfsgerechte Bereitstellung von solarer Prozess- und Fernwärme im Mittel- und Hochtemperaturbereich sowie elektrischer Energie in (bestehende) Industrieprozesse unter Verwendung von Wärmespeichern an der Strom-Wärme-Sektorgrenze
- Verbesserte Flexibilität im Stromnetz, etwa durch speichergestützte PtH-Lösungen, Wärmespeicherkraftwerke oder Wärmespeicher-KWK

Um die genannten Ziele zu erreichen, sind Grundlagen zu ermitteln und Werkzeuge weiterzuentwickeln. Dazu gehören:

- Weitere Flexibilisierung von CSP-Kraftwerkskomponenten, z. B. für ein verbessertes Teillastverhalten bei gleichzeitiger Entwicklung von Flexibilisierungskonzepten auf Angebots- und Nachfrageseite
- Sektorenübergreifende Systemanalyse und Optimierung. Identifikation von Markthindernissen und Bewertung von neuen Geschäftsmodellen (z. B. Energy as a Service)
- Vorbereitung von Demonstrationsprojekten durch Analysen und Optimierungen zur Prozesswärmebereitstellung
- „Open Source/Open Access“-Software mit hoher zeitlicher Auflösung für Auslegung und Optimierung von Hybridsystemen und Speichern und ein systematischer Vergleich verschiedener Technologie-Varianten. Definition und Implementierung von Schnittstellen zu bestehenden Datenquellen und Systemen
- Weiterentwicklung und verbesserte Nutzung von Nowcasting- und Forecasting-Verfahren für Wind und Solarstrahlung zur Integration volatiler erneuerbarer Quellen ins Energiesystem bzw. in Industrieprozesse



QUARZ-Zentrum des DLR zur Qualitätsüberprüfung von CSP-Komponenten und -Systemen.

2: Technologische Weiterentwicklung von CSP- und thermischen Speicher-Komponenten

Schlüsselkomponenten müssen weiterentwickelt werden, damit diese kostengünstiger und gleichzeitig umweltverträglich produziert werden können. Bei F&E sollte künftig ein stärkerer Fokus auf verbessertem Design, Lebensdauer und Wartbarkeit liegen.

Dies bedeutet im Einzelnen:

- Einsatz und Entwicklung neuer Materialien und neuer Fertigungsverfahren wie z. B. additives Manufacturing und neuer Montage/Installationsverfahren
- Funktionsnachweis in Schlüsselkomponenten
- Erhöhung der Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Degradation und Wartbarkeit von Komponenten und Systemen für Hochtemperaturprozesse (Strom/Wärme) und integrierte PtH- und Speicherlösungen auf der Basis von Erfahrungen komplexer Zustandsüberwachung
- Erhöhung der Betriebssicherheit und Kostenreduktion von Komponenten auf der Basis von Salz- oder Metallschmelze als Wärmeträger (Turm, Rinne, Speicher)
- Verbesserung von thermischen Speichern hinsichtlich kompakterer, leistungsstärkerer und kostengünstigerer Konzepte mit verbesserter Lade/Entlade-Charakteristik und erweitertem Temperaturbereich
- Erhöhung von Einsatztemperaturen und Leistungsdichte von Solarsystemen und Elektroerhitzern für Stromerzeugung und PtH/Speicherlösungen mit hoher Effizienz, auch in Verbindung mit neuen Wärmeträgerfluiden
- Weiterentwicklung und Demonstration von Speicherkraftwerken bzw. KWK- und Druckluftspeichern als Flexibilitätsoption am Strommarkt und/oder bedarfsgerechte Industrie- bzw. Fernwärme
- Weiterentwicklung von Konzentrador-Systemen in Bezug auf einen autonomen, sicheren und effizienten Betrieb

3: Digitalisierung

Ziel der Digitalisierung solarthermischer Kraftwerke und komplexer thermischer Speichersysteme ist es, die Energiegestehungs- bzw. Speicherkosten zu senken und die Zuverlässigkeit und Lebensdauer zu erhöhen. Die komplexe Orchestrierung der vielzähligen, verteilten und heterogenen Komponenten zu einem effizienten, verlässlichen und weitgehend autonomen Betrieb ist ausschließlich computergesteuert erreichbar.

bar. Geeignete IT-Systemarchitekturen, Protokolle und Datenmodelle für Vernetzung und Datengenerierung, die der Komplexität einer kritischen Energiewandlungsanlage gerecht werden, müssen erforscht werden. Es gilt, digitale Abbilder (digital twins) des Systems zu erstellen, um den heute noch weitgehend erfahrungsgetriebenen Betrieb der Anlagen zu verbessern. Dazu sind folgende Forschungsschwerpunkte (weiterhin) zu bearbeiten:

- Reduktion der Kosten für die Mess-Sensorik, zum Beispiel für den Masseneinsatz in Heliostaten
- Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI), um Messdaten aus unterschiedlichen Datenquellen zu fusionieren und interpretieren
- Generische und selbstadaptierende Verfahren mit Hilfe von KI für die Entwicklung von digitalen Zwillingen als Prädiktions- und Regelungsmodelle. Forschungsschwerpunkte: Methoden und Technologien, die die Verlässlichkeit der Prädiktion verbessern und quantifizieren sowie den Lernprozess während des Kraftwerksbetriebs überwachen
- Entwicklung von autonomen Betriebsassistenten auf Basis der neuen Möglichkeiten eines digitalen Kraftwerks
- Genauere Ermittlung und Validierung von nicht direkt messbaren Größen, wie z. B. dem Ladezustand der Speichersysteme oder dem Zustand einzelner Heliostatkomponenten
- Identifikation von prädiktiven Wartungsmaßnahmen

Demonstrationsanlagen und Pilotprojekte aus Forschung und Industrie sollen zu einer Blaupause für digitalisierte CSP-Projekte und thermische Speichersysteme werden. Eine Vernetzung solcher Systeme auf Energiesystemebene ermöglicht zudem ein optimales Zusammenspiel mit anderen Erneuerbare-Energien-Technologien.

4: Standardisierung

Pränormative Forschung entwickelt Mess-, Auslegungs- oder Abnahmeverfahren, um die Qualitätseigenschaften von Komponenten nachvollziehbar und mit definierter Genauigkeit zu ermitteln und geeignete Schnittstellen in Systemen zu definieren. Im vorliegenden Themenbereich gibt es für viele relevante

Qualitätsparameter noch keine Messverfahren und keine sinnvolle Definition von Schnittstellen.

Im Bereich der solarthermischen Kraftwerke besteht der Bedarf an standardisierbaren Verfahren für folgende Bereiche:

- Ertragsbestimmung von Prozesswärmesystemen und Hybridkraftwerken
- Qualitätseigenschaften von Receivern für Turmkraftwerke
- Qualitätseigenschaften von Wärmeträgern, Konzentratoren und für die Verschmutzung und Degradation von Oberflächen
- Schnittstellen für die (Fern-)Steuerung von Anlagen; Einbindung von meteorologischen Vorhersagen

Im Bereich der Speichersysteme liegt der Fokus auf:

- Standardisierten Bewertungs- und Auslegungsverfahren (z. B. Entwicklung von Richtlinien zur Speicherauslegung)
- Deutscher Normung von Flüssigsalz- und Feststoffspeicherung zur Qualitätsabsicherung in Anlehnung an andere EU und internationale Regelwerke

5: Chemische Energieträger aus CSP

Solare Produktionsverfahren für Wasserstoff, Methanol, Kohlenwasserstoffe und Ammoniak sind essenzielle Pfade zur Defossilisierung industrieller Prozesse und zudem eine sinnvolle Ergänzung von elektrisch betriebenen Prozessen. Folgende Forschungsschwerpunkte stehen im Fokus:

- Einkopplung von Solarstrom und -wärme in die (Hochtemperatur-)Elektrolyse
- Einsatz von Energiespeichern zur Erhöhung der Betriebsstunden und Deckung des Leerlaufverbrauchs von Solarchemie-Anlagen. Deutliche Steigerung des Wirkungsgrads im Vergleich zum Stand der Technik durch innovative thermochemische Prozesse zur Herstellung von Wasserstoff und Synthesegas

- Benchmarking von innovativen Lösungen gegen die Kombination von PV mit Elektrolyse durch Simulation mit numerischen Modellen (Analyse der gesamten Produktionskette, z. B. inkl. Fischer-Tropsch-Anlage)
- Komponententests im Labor- und Technikumsmaßstab unter realistischen Betriebsbedingungen, um ihre technische Machbarkeit und Effizienz zu belegen
- Für Verfahren mit hohem berechneten Potenzial: Realisierung von Pilotanlagen; für bereits heute großtechnisch verfügbare Technologien großskalige Demonstration
- Simulation der Kopplung von solarer Energiebereitstellung (Wärme und Strom) und Entwicklung detaillierter Modelle der gesamten Verfahrenskette. Analyse, wie Solarenergie optimal in eine Verfahrenskonstellation integriert werden kann, um möglichst effizient Kraftstoffe zu generieren
- Adaption chemischer Reaktionstechnik auf Reivertechnologien konzentrierender Solarthermie
- Optimierte Reaktionsführung in Ein- und Mehrphasensystemen, Zu- und Abführung von Edukten und Produkten, u.a. durch thermische Simulation des Reaktionsraums unter Einbeziehung der Stoffströme
- Entwicklung von Materialkomposite höchster Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit
- Weiterentwicklung der Pyrolyse von Methan zu Wasserstoff und Kohlenstoff vom Labor zum Technikum (als effiziente Übergangslösung von der fossilen zur solaren Wasserstoffversorgung)

Fazit

Werden die hier formulierten wissenschaftlichen Ziele erreicht, ist die Basis für eine zukunftssichere deutsche Industrie geschaffen. Sie wird in der Lage sein, Anlagen zu errichten und zu betreiben, die in vielen Märkten (national wie international) eine lastflexible Bereitstellung von Strom und Industrierwärme mit hohen Deckungsanteilen aus regenerativen Energiequellen ermöglichen. Dies gelingt durch eine effiziente Kombination unterschiedlicher erneuerbarer Energien und thermischer Energiespeicher.

5. TURBOMASCHINEN (AG4)

Motivation

Die Turbomaschinen sind für die aktuelle und zukünftige Energieversorgung unerlässlich. Etwa die Hälfte des deutschen sowie des europäischen Stroms wird aktuell über Turbomaschinen erzeugt. Turbomaschinen stellen die Wärmeversorgung sicher und sind in der Prozess- und Chemieindustrie essenziell.

Um auf ein nachhaltiges Energiesystem umzustellen, werden insbesondere in allen großtechnischen Energiewandlungsprozessen neuartige bzw. angepasste Turbomaschinen benötigt. Sie dienen in konventionellen Kraftwerken, die auf erneuerbare Energieträger umgestellt wurden, weiterhin als Kernkomponenten. Thermische Energiespeicher zum Ausgleich der volatilen Solar- und Windenergie brauchen Verdichter zur Ein- und Turbinen zur Ausspeicherung. Sektorenkopplung und Power-to-X-to-Power in großem Maßstab kann nur mithilfe von Turbomaschinen gelingen. Überschüssige Restenergie industrieller Prozesse wird in Turbomaschinen genutzt. Auch für die Solarthermie und Wärmepumpen werden Turbomaschinen benötigt. Zuletzt ermöglichen die Turbomaschinen den Transport von großen Mengen an Gasen und deren Verflüssigung und sichern so die weltweite Energieversorgung.

Die inhärente Volatilität der erneuerbaren Primärenergien verlangt insgesamt nach stark erhöhter Flexibilität der Maschinen und Anlagen. Darüber hinaus gilt es, die Turbomaschinen und deren Systeme nach wie vor sicher, robust, resilient, kostengünstig und effizient zu gestalten. Die Differenzierung im Markt – und damit die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie – wird neben der Nachhaltigkeit insbesondere über diese Eigenschaften gesichert.

Für diese vielfältigen Aufgaben und Anwendungen müssen die Turbomaschinen weiterentwickelt werden. Es ergeben sich die im Folgenden genannten primären Forschungs- und Entwicklungsbedarfe sowie einige Querschnittsthemen.

Aufgrund der aktuell im Wandel befindlichen globalen Energiepolitik ergeben sich darüber hinaus neue Herausforderungen wie beispielsweise die Optimierung von Turbomaschinen für verflüssigte Gase wie LNG oder LH₂. Da die Einsatzbedingungen zukünftig immer stärker diversifiziert sein werden, muss erforscht werden, wie der Einsatz der Maschinen in

unterschiedlichen Anwendungsgebieten und -bedingungen optimal gestaltet werden kann.



Notwendig: digitale Methoden zur Unterstützung der Turbomaschinen-Entwicklung.

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Turbomaschinen werden in verschiedenen Prozessen und Umgebungen eingesetzt. Dementsprechend ergeben sich ebenso vielfältige Forschungs- und Entwicklungsbedarfe.

Für das Erreichen der gesetzten Emissionsminderungsziele sind die folgenden drei Schwerpunktthemen identifiziert worden:

- Turbomaschinen für Power-to-X-Prozesse
- Turbomaschinen für Speicheranwendungen
- Wasserstoffnutzung in Gasturbinen zur Stromerzeugung und in Industrieprozessen

Die weiteren Forschungs- und Entwicklungsthemen

- Pipelineverdichter für ein zukünftiges H₂-Netz
- Turbomaschinen für nicht-konventionelle Medien und CCUS
- Turbomaschinen für die Wärmeversorgung, u. a. Wärmepumpen
- Turbomaschinen für erneuerbare Energiequellen und zur energetischen Prozessoptimierung
- Turbomaschinen mit CO₂-Abscheidung

Neben diesen müssen die Querschnittsthemen

- Digitalisierung,
- Fertigung und
- Grundlagenforschung

vorangetrieben werden, um so die Innovationen bei den konkreten Forschungsthemen zu hebeln.

1: Turbomaschinen für Power-to-X-Prozesse

Für nahezu alle Power-to-X-Konversionsprozesse werden Turbomaschinen benötigt. Bisherige Turbomaschinen sind nicht für die speziellen Einsatzgebiete ausgelegt. Bei einer für 2045 prognostizierten großen installierten Leistung von 100 GW und einem großen jährlichen Energieumsatz von 900 TWh sind auf die Prozesse speziell angepasste Maschinen zu entwickeln, um eine effiziente Energiekonversion zu gewährleisten. Dies muss in enger Abstimmung mit der Industrie geschehen, da die dortigen Prozessumstellungen die Randbedingungen für die zu entwickelnden Maschinen stellen. Forschungsschwerpunkte sind:

- Weiterentwicklung von Turbomaschinen für spezifische Konversionsprozesse
- Optimierung von Synthesegasverdichtern
- Elektrische Gas- und Dampfpander zur Leistungsbereitstellung in einer elektrifizierten Prozessindustrie

2: Turbomaschinen für Speicheranwendungen

Künftig ist ein verstärktes Speichern von vorhandener Energie aufgrund der volatilen Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energiequellen und der fortschreitenden Sektorenkopplung nötig. Für 2045 sind 50 GW installierte Speicherleistung und ein jährlicher Energieumsatz von 500 TWh prognostiziert. Turbomaschinen sind die zentralen Prozesskomponenten für diese Speicherverfahren. Die verschiedenen Verfahren stellen dabei unterschiedliche Anforderungen an die zum Einsatz kommenden Turbomaschinen. Diese müssen an das jeweilige Speicherverfahren angepasst werden. Die dabei identifizierten Schwerpunkte lauten:

- Integration von Turbomaschinen in bestehende und neuartige Speicherkonzepte, bei optimierten Fahrweisen

- Thermomechanische Speicherkonzepte mit verbesserter Lade- und Entladedynamik, erweitertem Temperaturbereich und höherer Speichereffizienz, wie z. B. Compressed Air Energy Storage, Liquid Air Energy Storage, Electrothermal Energy Storage, Carnot-Batterien etc.
- Anpassung der Turbomaschinen für Speicherprozesse mit innovativen Kreislaufmedien, wie z. B. CO₂, Ammoniak, Organic Rankine Cycle-Fluide
- Bereitstellung von Funktionen zur Netzstabilisierung und Schwarzstartfähigkeit durch Turbomaschinen in Speichersystemen
- Anwendungsoptimierte Werkstoffe, Komponenten und Betriebskonzepte



Turbomaschinen-Strang, mit dem Ammoniak hergestellt werden kann.

3: Wasserstoffnutzung in Gasturbinen zur Stromerzeugung und in Industrieprozessen

Zukünftig werden mit grünem Wasserstoff betriebene Gasturbinen eine nachhaltige, flexible und standortunabhängige Stromversorgung ermöglichen. Während einige Gasturbinen für die Beimischung von Wasserstoff qualifiziert sind, existiert zum aktuellen Zeitpunkt noch keine größere Gasturbine für den Betrieb mit reinem Wasserstoff. Im Energiewandlungssystem der Zukunft stellen Gasturbinen mit für 2045 prognostizierter installierter Leistung von 70 GW und jährlichem Energieumsatz von 50 TWh weiterhin eine sehr wichtige Technologie dar. Um eine Defossilisierung zu ermöglichen, muss der Betrieb von großen Gasturbinen zur Stromerzeugung mit bis zu 100 Prozent Wasserstoff ermöglicht werden. Das gilt sowohl für neu entwickelte Gasturbinen als auch für den Retrofit bzw. die Nachrüstung bestehender Kraftwerksanlagen. Die dafür definierten Forschungsschwerpunkte sind:

- Stabilität der Wasserstoff-Verbrennung bei Mischungsgraden von 0-100 Prozent H₂ und hohen Ramp-Rates in allen Lastbereichen

- Einhaltung der Schadstoffemissionsgrenzen insbesondere von NO_x bei der Verbrennung von gecracktem NH_3
- Wasserstoffsichere Werkstoffe, auch unter Berücksichtigung der für die neuen Randbedingungen benötigten Fertigungstechnologien
- Korrosion, Erosion, Kühlung
- Thermoakustik
- Lebensdauer der Komponenten
- Nachrüstung von bestehenden Gasturbinen
- Turbomaschinen für die CCUS- CO_2 -Kreislaufwirtschaft und -Infrastruktur: Entwicklung von CO_2 -Verdichtern, superkritische CO_2 -Expansion
- Untersuchung von neuartigen Kraftstoffen (Ammoniak, Methanol) mit gegenüber konventionellen Brennstoffen veränderten Zusammensetzungen und Eigenschaften bezüglich Verwendbarkeit in Turbomaschinen: Verbrennungsverhalten, Teillastverhalten
- Neuartige (Kombi-)Kraftwerksprozesse mit individuell auf die Randbedingungen des Kraftwerks angepassten Arbeitsmedien zum Erzielen höherer Wirkungsgrade

Neben den Gasturbinen für die Stromerzeugung müssen Kraftwärmekopplungsanlagen auf Basis von Gasturbinen sowie Industriegasturbinen für das Verbrennen von Wasserstoff angepasst werden. Hierbei sind die Integration in den Industrieprozess und die lokalen Gegebenheiten besondere Herausforderungen.

4: Pipelineverdichter für ein zukünftiges H_2 -Netz

Für eine Wasserstoffökonomie zur großtechnischen Nutzung von Wasserstoff muss ein Wasserstoff-Netz etabliert werden. Dazu müssen die Pipeline-Verdichter aufgrund des veränderten Arbeitsmediums (Umstellung von Erdgas auf H_2) entwickelt und angepasst werden. Daraus ergeben sich folgende Forschungsschwerpunkte:

- Tiefgreifendes Verständnis der aerodynamischen Herausforderungen durch den Medienwechsel
- Dichtungskonzepte für Wasserstoff
- Wasserstoffgeeignete Werkstoffe für die geforderten hohen Drehzahlen

5: Turbomaschinen für nicht-konventionelle Medien und CCUS

Bisher wurden in Turbomaschinen typischerweise nur wenige verschiedene Strömungsmedien (Luft, Dampf, Abgas, Wasser) angewendet. Die Bandbreite der eingesetzten Strömungsmedien wird aufgrund von Sektorenkopplung, zukünftiger CO_2 -Kreislaufwirtschaft und neuartigen Kreisprozessen stark erweitert. Daraus ergeben sich für Turbomaschinen folgende Forschungsschwerpunkte:

6: Turbomaschinen für die Wärmeversorgung, u. a. Wärmepumpen

Hochtemperatur-Wärmepumpen stellen bei der Elektrifizierung aller Sektoren Wärme für industrielle Prozesse bereit. Diese müssen weiterentwickelt werden, um den steigenden Anforderungen gerecht zu werden. Die Forschungsschwerpunkte liegen dabei auf

- Entwicklung von Hochtemperaturkomponenten (Materialien, Dichtungen etc.) und Lebensdauerbetrachtung
- Betriebsweise und Teillastverhalten

7: Turbomaschinen für erneuerbare Energiequellen und zur energetischen Prozessoptimierung

Bei der Energiebereitstellung durch erneuerbare Energiequellen wie Solarthermie und Geothermie erfolgt die Umwandlung der gespeicherten Wärmeenergie in elektrischen Strom ebenfalls über Turbomaschinen, in der Regel über Dampfturbinen.

Bei vielen Prozessen besteht das Potenzial, vorhandene Restenergien nutzbar zu machen. Beispielsweise kann das bei der Regasifizierung von flüssig gespeicherten Brennstoffen (z. B. LNG, LH_2) abfallende Druckpotenzial mithilfe von Turbinen verwertet werden. In ähnlicher Weise kann überschüssige Wärme als Energiequelle für Anschlussprozesse dienen. Daraus ergeben sich die folgenden Forschungsschwerpunkte:

- Turbomaschinen zum energetischen Nutzen von Expansionsprozessen

- Anpassung von Organic-Rankine-Cycle-Prozessen, z. B. durch den Einsatz neuer Arbeitsmedien und verbesserte Abstimmung mit Turbomaschinen (aero-thermodynamische Auslegung, Scale-Up)

8: Turbomaschinen mit CO₂-Abscheidung (Carbon Capture)

Bis das Energiesystem vollständig auf Wasserstoff umgestellt ist, werden bestehende und zukünftige Gasturbinen- und GuD-Anlagen weiterhin mit Erdgas/LNG betrieben. Um den CO₂-Ausstoß zu minimieren, sollten diese für die Abscheidung und Speicherung von CO₂ (Carbon-Capture und Storage, CCS) ertüchtigt werden. Damit dies effektiv und kostengünstig erfolgt, muss der CO₂-Anteil im Abgas deutlich erhöht sowie der Abgasmassenstrom reduziert werden. Folgende Forschungsschwerpunkte werden adressiert:

- Entwicklung einer stabilen Verbrennung mit Abgasrückführung
- Entwicklung eines zusätzlichen, sequenziellen Verbrennungssystems im Abgas des nachgeschalteten Dampfprozesses
- Anpassung der Gasturbinen- und GuD-Prozesse mit Abgasrückführung; Analyse von möglichen Betriebsweisen hinsichtlich Laständerungsraten, zunehmender Start und Stopp-Zyklen, Teillastverhalten etc.

9: Querschnittsthemen

Die fortschreitende Digitalisierung bietet weitreichendes Verbesserungspotenzial der interdisziplinären Auslegungs- und Entwicklungsprozesse von Turbomaschinen. Dazu wurden die folgenden Forschungsschwerpunkte identifiziert:

- Einsatz von künstlicher Intelligenz und Machine Learning im Entwicklungsprozess
- Tool-Entwicklung und -Integration
- Vernetzte interdisziplinäre Auslegungsketten
- Digitaler Zwilling zur Anlagenüberwachung und Optimierung von Servicekonzepten

Fazit

Um die für 2045 angesetzten Emissionsreduktionen erfüllen zu können, müssen Turbomaschinen weiterentwickelt und spezifisch adaptiert werden. Dazu müssen die genannten Forschungsschwerpunkte gezielt vorangetrieben und weitere Forschungsthemen flankierend beibehalten bzw. ergänzt werden.

Turbomaschinen sind essenziell, um die Klimaziele zu erreichen. Zudem kann mit den skizzierten Schritten ein Beitrag dazu geleistet werden, die Marktposition Deutschlands im Turbomaschinensektor zu erhalten bzw. zu erweitern. Dadurch werden langfristig Arbeitsplätze und Wertschöpfung am Standort Deutschland gesichert.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die kostengünstige Bereitstellung von Strom, Wärme und chemischen Energieträgern aus erneuerbaren Energien ist eine der großen Herausforderungen im Kampf gegen den globalen Klimawandel. Hinzu kommt die veränderte geopolitische Lage in Europa durch den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine. Sie zeigt, wie notwendig eigenes Know-how und möglichst autarke Energiesysteme sind.

Der weitere Ausbau volatiler erneuerbarer Energieträger erfordert kontinuierliche Forschungsanstrengungen, um nachhaltige Flexibilisierungsoptionen bereitzustellen, die heute noch durch die Verbrennung fossiler Energieträger realisiert werden. Ziel ist es, konventionelle Kraftwerke möglichst CO₂-arm zu betreiben. Dazu sind Technologien wie die Wasserstoffverbrennung, die CO₂-Abtrennung oder die Nutzung solar erzeugter Hochtemperaturwärme Schlüsselbausteine.

Für das zeitliche Entkoppeln von Energieverbrauch und -bereitstellung sind Speicher bedeutsam. Turbomaschinen bilden in Kombination mit thermischen Energiespeichern die Basis für unterschiedlichste Speicher-

kreisläufe. Sie werden zudem benötigt, um den Stromsektor mit dem Wärme- und dem Verkehrssektor zu koppeln (Stichwort: Power-to-X) und zu defossilisieren.

Veränderte Energieflüsse erfordern darüber hinaus eine angepasste Energieinfrastruktur. Bei einigen industriellen Prozessen, wie z. B. der Zementherstellung, lassen sich CO₂-Emissionen (noch) nicht vermeiden. Für das Energiesystem der Zukunft besteht daher auch Forschungsbedarf für eine CO₂-Infrastruktur (CCU-/CCS-Technologien).

Mit den in diesen Forschungsempfehlungen formulierten wissenschaftlichen Zielen wird zudem die Basis für eine zukunftsfähige deutsche Industrie geschaffen. Die skizzierten Schritte leisten einen wichtigen Beitrag zum Erhalt und Ausbau der deutschen Marktposition. Damit werden Arbeitsplätze und Wertschöpfung am Standort Deutschland langfristig gesichert und der erfolgreiche Export von Komponenten, Anlagen und Dienstleistungen „Made in Germany“ weiterhin gewährleistet.



Modell eines klimafreundlichen Energiesystems mit CSP-, PV- und Windenergie-Anlagen sowie Speichern und einem fossilen Backup-System, sodass auch in Windflauten und Sonnepausen bedarfsgerecht Strom ins Netz eingespeist werden kann.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages