

POSITIONSPAPIER

# Energiewende: verlässlich, machbar, technologieoffen



---

Andreas Dreizler, Heinz Pitsch, Christof Schulz, Johannes Janicka





## DIE AUTOREN

### **Prof. Dr. Andreas Dreizler**

Technische Universität Darmstadt  
Fachbereich Maschinenbau  
Fachgebiet für Reaktive Strömungen  
und Messtechnik  
Otto-Berndt-Str. 3, 64287 Darmstadt



### **Prof. Dr.-Ing. Heinz Pitsch**

RWTH Aachen University  
Fakultät für Maschinenbau  
Institut für Technische Verbrennung  
Templergraben 64, 52056 Aachen



### **Prof. Dr. Christof Schulz**

Universität Duisburg-Essen  
Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Institut für Verbrennung und Gasdynamik –  
Reaktive Fluide  
Carl-Benz-Str. 199, 47057 Duisburg



### **Prof. Dr.-Ing. Johannes Janicka**

Technische Universität Darmstadt  
Fachbereich Maschinenbau  
Fachgebiet für Energie- und Kraftwerkstechnik  
Otto-Berndt-Str. 3, 64287 Darmstadt

---

## DIESES POSITIONSPAPIER WIRD UNTERSTÜTZT DURCH:

**Prof. Dr. Burak Atakan**, Universität Duisburg-Essen  
**Prof. Dr.-Ing. Hans-Jörg Bauer**, Karlsruher Institut für Technologie  
**Prof. Dr. Frank Behrendt**, Technische Universität Berlin  
**Prof. Dr.-Ing. Frank Beyrau**, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
**Dr.-Ing. Benjamin Böhm**, Technische Universität Darmstadt  
**Prof. Dr.-Ing. Henning Bockhorn**, Karlsruher Institut für Technologie  
**Prof. Dr. Olaf Deutschmann**, Karlsruher Institut für Technologie  
**Prof. Dr. Francesca di Mare**, Ruhr-Universität Bochum  
**Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker**, Leibniz Universität Hannover  
**Jun.-Prof. Dr. Neda Djordjevic**, Technische Universität Berlin  
**Prof. Dr. Ravi Xavier Fernandes**, Physikalisch Technische Bundesanstalt Braunschweig  
**Prof. Dr.-Ing. Manfred Fischedick**, Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt, Energie  
**Dr. Klaus Peter Geigle**, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
**Prof. Dr.-Ing. Dirk Geyer**, Hochschule Darmstadt  
**Prof. Dr. Eva Gutheil**, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg  
**Prof. Dr.-Ing. Christian Hasse**, Technische Universität Darmstadt  
**Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Egon Hassel**, Universität Rostock  
**Prof. Dr. Sebastian Kaiser**, Universität Duisburg-Essen  
**Prof. Dr. Tina Kasper**, Universität Duisburg-Essen  
**Prof. Dr.-Ing. Andreas Kempf**, Universität Duisburg-Essen  
**Prof. Dr.-Ing. Markus Klein**, Universität der Bundeswehr München  
**Prof. Dr.-Ing. Reinhold Kneer**, RWTH Aachen University  
**Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch**, Karlsruher Institut für Technologie  
**Prof. Dr. Katharina Kohse-Höinghaus**, Universität Bielefeld  
**Prof. Dr. Andreas Kronenburg**, Universität Stuttgart  
**Prof. Dr. Walter Leitner**, Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion  
**Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Alfred Leipertz**, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
**Prof. Dr. Ulrich Maas**, Karlsruher Institut für Technologie  
**Dr.-Ing. Detlef Markus**, Physikalisch Technische Bundesanstalt Braunschweig  
**Prof. Dr.-Ing. Fabian Mauss**, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg  
**Dr. Wolfgang Meier**, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
**Prof. Dr. Reinhard Mönig**, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
**Prof. Dr. Matthias Olzmann**, Karlsruher Institut für Technologie  
**Prof. Dr.-Ing. Christian Oliver Paschereit**, Technische Universität Berlin  
**Dr. Sebastian Peukert**, Universität Duisburg-Essen  
**Prof. Dr. Michael Pfitzner**, Universität der Bundeswehr München  
**Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger**, RWTH Aachen University  
**Prof. Wolfgang Polifke**, Ph.D., Technische Universität München  
**Prof. Dr. Uwe Riedel**, Universität Stuttgart  
**Prof. Dr. Amsini Sadiki**, Technische Universität Darmstadt  
**Prof. Dr.-Ing. Viktor Scherer**, Ruhr-Universität Bochum  
**Dr. Arne Scholtissek**, Technische Universität Darmstadt  
**Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schröder**, RWTH Aachen University  
**Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Dominique Thévenin**, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
**Prof. Dr.-Ing. Dimosthenis Trimis**, Karlsruher Institut für Technologie  
**Prof. Dr. Eberhard Umbach**, Karlsruher Institut für Technologie  
**Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weigand**, Universität Stuttgart  
**Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing**, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
**Prof. Dr.-Ing. Stefan Will**, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg  
**Prof. Dr.-Ing. Nikolaos Zarzalis**, Karlsruher Institut für Technologie  
**Dr.-Ing. Lars Zigan**, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

---

## INHALTSVERZEICHNIS

---

Vorwort	6
Zusammenfassung	8
1. Grundlagen	10
2. Phasen und Kosten der Transformation	16
3. Anwendungen	20
3.1. Stromversorgung	21
3.2. Mobilität	28
3.3. Industrie	32
3.4. Gebäude	34
4. Forschung	36
Anhang	46
Literatur	46
Glossar	48
Impressum	54

---

---

# Vorwort

Die Vorhersagen der Klimaforschung sind hochgradig besorgniserregend. Gleichzeitig spornen sie zu raschem Handeln an. Um die drohende Klimakatastrophe zu vermeiden, muss das globale Energiesystem schnellstmöglich so umgestaltet werden, dass nahezu keine Treibhausgase mehr in die Atmosphäre entweichen. In diesem Ziel ist man sich weitgehend einig. Davon zeugen internationale Vertragswerke wie etwa die Sustainable Development Goals [SDG] der Vereinten Nationen oder der 2019 vorgestellte European Green Deal [EGD], aber auch die jüngst erschienene Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung [Bm20].

Im Kontrast zu dieser Einmütigkeit werden die zu ergreifenden technischen Maßnahmen sehr kontrovers diskutiert. Konsens im Ziel, Dissens im Weg – so lässt sich die Situation zusammenfassen.

Das vorliegende Positionspapier will die Sicht der Ingenieurwissenschaften stärker in die Diskussion einbringen. Die Verfasser treibt dabei die Sorge um, dass zentrale technische Möglichkeiten, die aus ökologischer und ökonomischer Sicht für unsere Gesellschaft wichtig sind, vernachlässigt

---

werden. Sie plädieren für einen Wettbewerb zwischen unterschiedlichen technischen Lösungen, um die ökologischen Ziele in ökonomisch bester Weise zu erreichen. Hierfür sollte die Politik Rahmenbedingungen, nicht jedoch Technologiepfade vorgeben.

Zentraler Baustein eines klimaneutralen Energiesystems ist aus Sicht der Autoren und Unterstützerinnen und Unterstützer dieses Positionspapiers die thermische Nutzung chemischer Energieträger. Synthetische kohlenstoffhaltige Brennstoffe sowie kohlenstofffreie chemische Energieträger werden unverzichtbar für eine zuverlässige Stromerzeugung und die Versorgung der großen Sektoren Mobilität, Industrie und Gebäude sein.

Deutschland verfügt über exzellentes Know-how zur Schaffung, nachhaltigen Nutzung und Weiterentwicklung thermochemischer Energietechnologien. Es ist wichtig, diese Kompetenzen in universitären und außeruniversitären

Instituten, aber auch in der Industrie im Land zu halten und zu nutzen – insbesondere auch im Kontext eines sich verschärfenden internationalen Wettbewerbs.

Dieses Positionspapier ist das Resultat intensiver Diskussionen einer Gruppe von mehr als fünfzig international renommierter Forscherinnen und Forschern, die sich wissenschaftlich mit chemisch reaktiven Strömungen und Energieverfahrenstechnik befassen. Eingeflossen sind zudem die Ergebnisse national und international akzeptierter Fachstudien. Hervorgehoben seien hier vor allem neuere Arbeiten wie die dena-Studie [De18] und die ACATECH-Studie [Ac17], aber auch weitere Analysen [Ge18, Ac15, Ac18, Ac19, De19, Ac20].

Das Positionspapier zeigt auf, wie die Energiewende gemeinsam gelingen kann. Es ist zudem ein Appell: Lassen Sie uns die erkennbaren Optionen nutzen und neue Ideen offen erforschen!

**Andreas Dreizler**  
TU Darmstadt

**Heinz Pitsch**  
RWTH Aachen

**Christof Schulz**  
Uni Duisburg-Essen

**Johannes Janicka**  
TU Darmstadt

---

# Zusammenfassung

Eine klimaneutrale Zukunft ist erreichbar, wenn es gelingt, die Energieversorgung auf erneuerbare Energiequellen umzustellen und fossile Energieträger zu vermeiden. Über dieses **Ziel** ist man sich hierzulande weitgehend einig. Kontrovers diskutiert werden die Wege zur Erreichung des Ziels.

Um die Klimaziele zu erreichen, ist eine **technologieoffene** Herangehensweise erforderlich. Denn der Energiemix der Zukunft wird deutlich vielfältiger sein als heute und auch bisher noch wenig erforschte Technologien umfassen.

Der öffentliche Diskurs kann von Erkenntnissen aus **Ingenieur- und Naturwissenschaften** enorm profitieren. Denn dort werden ökologisch wünschenswerte und ökonomisch tragfähige Technologien für die Zukunft erdacht und entwickelt.

Eine schrittweise, überschaubare **Transformation des Energiesystems** in Richtung Klimaneutralität wird durch chemische Energieträger und Verfahren zur thermochemischen und elektrochemischen Energieumwandlung ermöglicht. Die Bandbreite chemischer Energieträger reicht von biogenem sowie synthetischem Brennstoff bis zu Wasserstoff aus erneuerbaren Energien; zu den thermochemischen Energiewandlern gehören beispielsweise Gaskraftwerke.

**Thermochemische Energieumwandlungstechnologien** sind erwiesenermaßen zuverlässig und robust. Durch die weitere Nutzung von Gasturbinen in der Stromwirtschaft oder verbrennungsmotorisch-elektrischen Hybridantrieben im Bereich Mobilität – um nur zwei Beispiele zu nennen – lassen sich bewährte Anlagen für die Energiewende nutzen und die Nachteile eines disruptiven Technologiewechsels vermeiden.

Thermochemische Energieumwandlungsprozesse können auch künftig maßgeblich zur Versorgungssicherheit beitragen und die Kosten in allen **Phasen** der Systemtransformation überschaubar halten. Kurzfristig (Phase 1) lassen sich bestehende Infrastrukturen nutzen. Diese Infrastruktur wird mittelfristig (Phase 2) ergänzt oder neu aufgebaut; parallel dazu werden Zukunftstechnologien entwickelt. Langfristig (Phase 3) kommen Technologien zum Zug, deren Potenzial bereits erkennbar, aber noch nicht erforscht ist.

In Phase 1 lassen sich die bisher überwiegend verwendeten chemischen Energieträger fossilen Ursprungs schrittweise durch synthetische Energieträger



---

**substituieren**, die mithilfe erneuerbarer Energien hergestellt werden. Ein Beispiel sind synthetische Kohlenwasserstoffe. In den Phasen 2 und 3 können zusätzlich kohlenstofffreie chemische Energieträger zur Anwendung kommen.

Ein nur auf Elektrizität ausgerichtetes Energiesystem kann den Bedarf nicht zuverlässig decken. Das liegt vor allem an den Produktionsschwankungen, denen Windkraft und Photovoltaik als die hierzulande wichtigsten regenerativen Energiequellen unterliegen, in Verbindung mit den unzureichenden Möglichkeiten zur **Stromspeicherung** in einem rein elektrischen System. Dadurch kommt es immer wieder zu einem Auseinanderklaffen von Angebot und Nachfrage.

Durch Atom- und Kohleausstieg entfallen in den nächsten Jahren wichtige Primärenergiequellen für die Grundversorgung. Um die Zuverlässigkeit des Energiesystems auszugleichen, sind **chemische Energieträger aus regenerativen Quellen** zur Rückverstromung in regelbaren Kraftwerken unverzichtbar.

Auch im Luft- und Schiffsverkehr über **weite Distanzen** wird es auf längere Sicht nicht ohne chemische Energieträger gehen. Durch zunehmende Beimischung von synthetischen zu fossilen Brennstoffen ist eine stufenlose Transition in Richtung Klimaneutralität möglich.

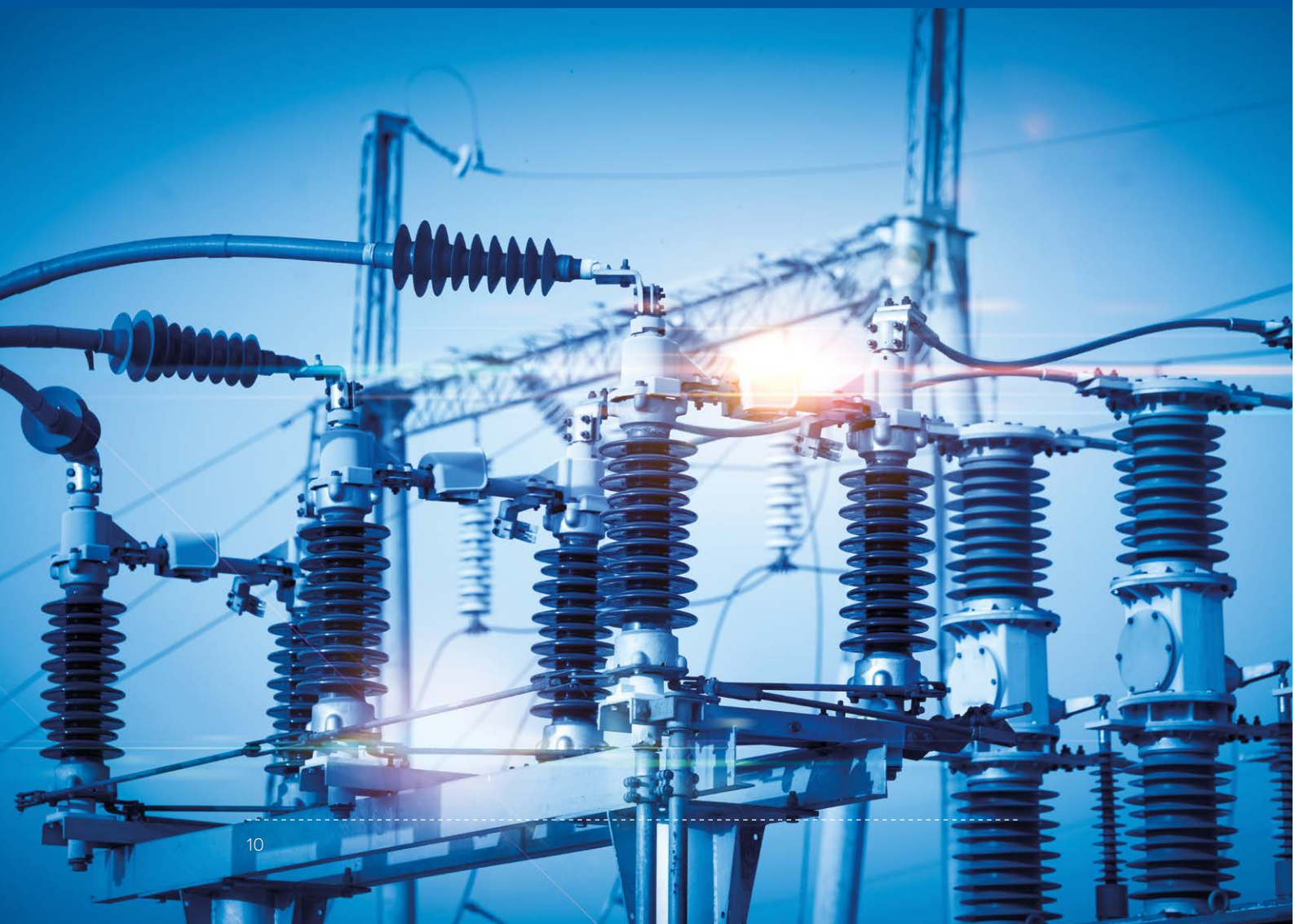
Deutschland verfügt über eine hervorragende Infrastruktur zur thermochemischen Verwertung chemischer Brennstoffe und über international anerkanntes Know-how in diesem Bereich – sowohl in der technischen Umsetzung als auch in der Forschung. Doch andere Länder holen auf und treten in Konkurrenz. Deshalb gilt es, bestehende **Vorsprünge** zu sichern und in die Praxis zu bringen.

Um die Potenziale chemischer Energieträger und entsprechender Technologien für die Energiewende möglichst rasch zu erschließen und volkswirtschaftlich zu nutzen, sind intensive **Forschung und Entwicklung** erforderlich. Der größte Bedarf besteht bei Energiekonvertern für den Betrieb mit verschiedenen Brennstoffen und Lasten, Rückhaltungsmethoden für Kohlenstoffdioxid und dessen anschließende Nutzung, Anlagen und Aggregate mit höheren Wirkungsgraden und weniger Schadstoffemissionen sowie neuen Verfahren für die experimentelle Untersuchung und computergestützte Simulation technischer Systeme.

---

1.

# Grundlagen



---

## DIE HERAUSFORDERUNG

Eine zentrale Aufgabe des 21. Jahrhunderts ist die Transformation der Energiewirtschaft in eine klimaneutrale Kreislaufwirtschaft. Dafür ist eine umfassende Elektrifizierung der Sektoren Mobilität, Industrie und Gebäude erforderlich<sup>1</sup>. Weltweit wird der Bedarf an elektrischer Energie daher in den kommenden Jahren stark zunehmen. Ihn zu decken, ist jedoch nicht die einzige Herausforderung für die Energiewirtschaft.

Bedingt durch den Atom- und Kohleausstieg in Deutschland müssen in den nächsten Jahren rund 65 Prozent der Kraftwerke, die das Land bisher zuverlässig mit Strom versorgen, abgeschaltet werden. Nun gilt es, diese sogenannten grundlastfähigen Kraftwerke, die im Jahr 2019 bei einer Nettostromerzeugung von 514,86 Terawattstunden [Fh19] noch maßgeblich zur Stromversorgung beitrugen, durch erneuerbare Energiequellen zu ersetzen.

Die wichtigsten Erzeuger erneuerbarer Energie<sup>2</sup> sind hierzulande Windkraft- und Photovoltaikanlagen. Ihr Beitrag zur Stromversorgung wird jedoch durch die geografische Lage Deutschlands begrenzt – der Wind weht einfach nicht stark genug und auch die Sonne kann den Bedarf nur zum Teil decken. Wind- und sonnenreiche Gebiete, die ein hohes Ausbaupotenzial mit großer Wirtschaftlichkeit vereinen, liegen vor allem an ausländischen Küsten, im Süden Europas und in Nordafrika. Nutzen lassen sich diese Vorteile für Deutschland aber nur, wenn es gelingt, zuverlässige Partnerschaften aufzubauen und bestimmte technische Herausforderungen zu meistern. Die bestehen zum einen in der räumlichen Trennung zwischen Produktion und Verbrauch erneuerbarer Energien, die möglichst verlustfrei über große Strecken transportiert und gespeichert werden muss. Probleme bereitet auch der zeitliche Versatz zwischen Verfügbarkeit und Nachfrage: Schließlich unterliegt der in Windkraft- und Photovoltaikanlagen erzeugte Strom wetterbedingt starken Produktionsschwankungen.

---

<sup>1</sup> Im Jahr 2018 beliefen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland insgesamt auf 866 Millionen Tonnen. Sie stammten vor allem aus folgenden Bereichen: Stromwirtschaft (35,9 Prozent), Industrie (22,6 Prozent), Mobilität (18,7 Prozent) und Gebäude (13,5 Prozent). (Gesamtemission ohne Berücksichtigung von Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft) [Ub19].

<sup>2</sup> Der Begriff Erneuerbare Energien ist im allgemeinen Sprachgebrauch üblich. Er wird daher auch in diesem Positionspapier verwendet, obwohl er physikalisch nicht korrekt ist. Gemeint sind damit technisch nutzbare Energieformen, die aus Wandlung zum Beispiel von Wind- und Sonnenenergie gewonnen wurden.

## DIE ENERGIETRÄGER

Für die Speicherung erneuerbarer Energie kommen unterschiedliche Verfahren infrage. Je nach Bedarf lässt sie sich elektrisch, elektrochemisch, mechanisch, thermisch oder chemisch in jeweils typischen Energieträgern speichern. Drei Beispiele: Eine Batterie ist ein elektrochemischer Energiespeicher, Kerosin ein chemischer und ein Kondensator ein rein elektrischer Energiespeicher.

Die Speicherarten unterscheiden sich nicht nur in ihrer Speicherkapazität, sondern auch hinsichtlich ihrer Ausspeicherdauer. Wie Abb. 1 zeigt, verbinden chemische Energieträger eine hohe Speicherkapazität mit langer Ausspeicherdauer<sup>3</sup>; im Vergleich mit anderen Energiespeichern belegen sie sogar Spitzenplätze.

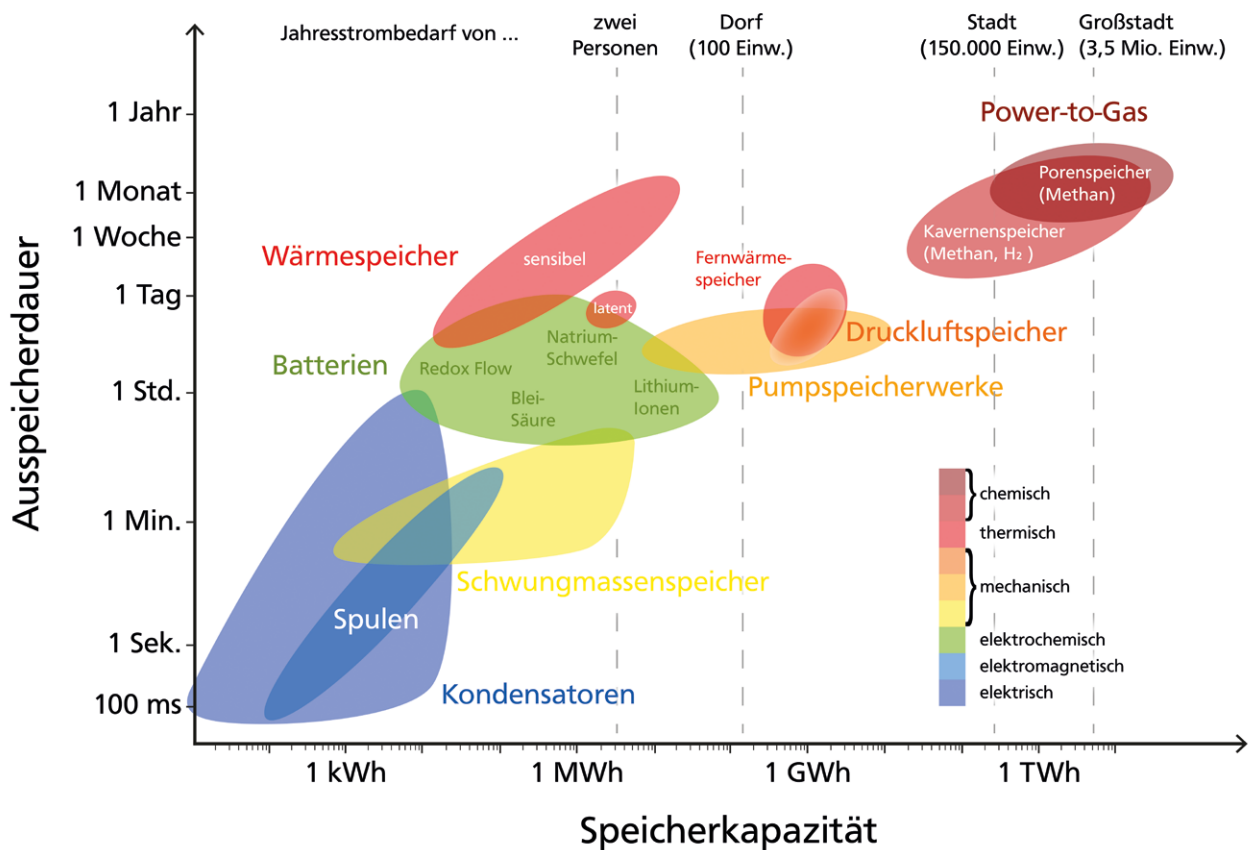


Abb. 1: Speicherkapazität und Ausspeicherdauer verschiedener Speichertechnologien im Überblick. Reproduziert nach [St14].

<sup>3</sup> Die Ausspeicherdauer besagt, wie lange ein Speicher Energie liefern kann. Sie berechnet sich aus dem Verhältnis von ausspeicherbarer Energie und Ausspeicherleistung. Nach [St14] wird in Kurz- und Langfristspeicher unterschieden. Beispiele für Kurzfristspeicher in Abb. 1 sind Kondensatoren oder Schwingungsmassenspeicher. Sie liefern Energie nur für kurze Zeiten von bis zu einigen zehn Sekunden. Speicher chemischer Energieträger wie Gasspeicher können langfristig über Monate hinweg Energie bereitstellen (Saisonalspeicher) und haben wenig Speicherverluste.

---

**Chemische Energieträger sind unerlässlich für die effiziente Nutzung erneuerbarer Energien. Nur mit ihrer Hilfe lassen sich Probleme lösen, die durch Diskrepanzen von Produktion und Bedarf entstehen.**

## **IM FOKUS: CHEMISCHE ENERGIE TRÄGER**

Chemische Energieträger werden nach ihrem Ursprung unterschieden. Bedeutende fossile chemische Energieträger sind Erdgas, Erdöl und Kohle, die sich in geologischer Vorzeit aus organischem Material gebildet haben. Synthetische chemische Energieträger hingegen entstehen unter Nutzung von erneuerbaren Energien. Um zum Beispiel Treibstoffe wie sogenannte E-Fuels herzustellen, wird elektrische Energie mithilfe von Elektrolyse in Wasserstoff und anschließend über Katalyse in flüssige oder gasförmige synthetische Brennstoffe umgewandelt und auf diese Weise speicherfähig gemacht. Zur Kategorie der synthetischen chemischen Energieträger gehören weiterhin Biobrennstoffe wie etwa Ethanol.

**Synthetische Brennstoffe leisten einen wichtigen Beitrag zur Speicherung erneuerbarer Energien.**

Synthetische chemische Energieträger gibt es in den Varianten kohlenstoffhaltig und kohlenstofffrei. Zu den kohlenstoffhaltigen Energieträgern zählen synthetisches Erdgas und andere synthetische Brennstoffe wie grüner Wasserstoff, E-Fuels oder Bio-Fuels. Beim Verbrauch dieser Energieträger, etwa beim Autofahren, wird das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) freigesetzt. Um CO<sub>2</sub>-Neutralität zu erreichen, muss das Gas unter erheblichem Aufwand und hohen Kosten aus der Atmosphäre entfernt<sup>4</sup> oder bei der Stromerzeugung in Kraftwerken abgetrennt werden.

---

<sup>4</sup> Die Kosten für eine CO<sub>2</sub>-Rückholung aus der Atmosphäre werden auf Beträge zwischen 92 und 232 USD pro Tonne CO<sub>2</sub> geschätzt [Ke18]. Dies entspricht 0,22 bis 0,54 € pro Liter Benzin.

---

Die Nutzung kohlenstofffreier chemischer Energieträger belastet die Atmosphäre nicht mit  $\text{CO}_2$ . Beispiele für kohlenstofffreie chemische Energieträger sind molekularer Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ), Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Metalle, Halbmetalle und einige Nichtmetalle. Auch bei der Nutzung von  $\text{H}_2$  und  $\text{NH}_3$  entweichen Reaktionsprodukte in die Luft, doch hier handelt es sich oft nur um harmlose Stoffe wie Wasserdampf beziehungsweise Wasserdampf und molekularer Stickstoff. Bei Metallen wie Eisen, Halbmetallen wie Silizium und Nichtmetallen wie Schwefel müsste das Reaktionsprodukt jedoch gesammelt und in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden.

## DIE THERMOCHEMISCHE ENERGIEUMWANDLUNG

Nutzbar wird die in chemischen Energieträgern aus erneuerbaren Quellen gespeicherte Energie mithilfe elektrochemischer<sup>5</sup> und thermochemischer<sup>6</sup> Verfahren zur Energieumwandlung. Während sich elektrochemische Verfahren – Beispiele dafür sind Brennstoffzellen und Flussbatterien – trotz enormer Entwicklungsbemühungen nur langsam im Markt durchsetzen, sind thermochemische Verfahren weit verbreitet und besonders zuverlässig. Dass letztere auch hervorragend zur Herstellung synthetischer Brennstoffe geeignet sind, beweist die Großanlage Great Plains Synfuels Plant in Beulah im US-Bundesstaat North Dakota: Dort wird seit rund zwanzig Jahren und praktisch im Dauerbetrieb synthetisches Erdgas unter anderem aus Biomasse hergestellt [Ko10].

**Die  $\text{CO}_2$ -neutrale bzw.  $\text{CO}_2$ -freie Nutzung chemischer Energieträger auf Basis thermochemischer Energieumwandlungstechnologien ist derzeit unverzichtbar.**

<sup>5</sup> Wichtige elektrochemische Energieumwandler sind zum Beispiel die Brennstoffzelle oder Flussbatterien.

<sup>6</sup> Der Fachterminus Thermochemie umfasst alle Hochtemperatur-Oxidationsprozesse, unabhängig davon, ob die chemischen Energieträger fossilen oder synthetischen Ursprungs sind.



Bewährte Technologie: Die Anlage Great Plains Synfuels Plant in Beulah/USA stellt seit mehr als zwanzig Jahren mithilfe thermochemischer Prozesse synthetisches Erdgas her.

### **FAZIT**

Die thermochemische Energieumwandlung von CO<sub>2</sub>-neutralen chemischen Energieträgern aus erneuerbaren Quellen ist von großer Bedeutung – zumindest in einer Übergangsphase, die aber jahrzehntelang währen kann. Für die thermochemische Energieumwandlung von kohlenstofffreien chemischen Energieträgern gibt es kein zeitliches Limit. Sie wird in vielen Sektoren auch langfristig bedeutsam für die Versorgung mit Endenergie sein.

---

2.

## Phasen und Kosten der Transformation





---

## DIE PHASEN

Ein klimaneutrales Energiesystem entsteht nicht von heute auf morgen. Die Infrastruktur muss weltweit umgebaut werden, neue Anlagen sind zu errichten und innovative Technologien wollen erst einmal erdacht und entwickelt werden.

Das alles braucht Zeit und kostet viel Geld. Um die Risiken überschaubar zu halten, plädieren die Autoren und Unterstützerinnen und Unterstützer dieser Stellungnahme für eine möglichst kontinuierliche Transformation ohne disruptive Brüche. Sinnvoll ist demnach ein zügiges Voranschreiten „auf Sicht“, gegliedert in drei Phasen:

- >> **Kurzfristig:** Fokus auf Drop-in-Technologien, die bestehende Infrastrukturen nutzen und in der Anfangsphase eine stufenlose Transition ermöglichen. In dieser Phase kann fossiles Erdgas beispielsweise durch synthetisches Erdgas ersetzt werden. So gewinnt man Zeit für einen Technologiewechsel, der parallel vorbereitet wird.
- >> **Mittelfristig:** Fokus auf Technologien für eine Übergangsphase, in der Infrastruktur ergänzt und/oder neu aufgebaut wird. In dieser Phase gibt es schon Anlagen, die zu 100 Prozent mit grünem Wasserstoff<sup>7</sup> als Ersatz für Erdgas betrieben werden können – kurzfristig sind nur Beimischungen bis maximal 20 Prozent möglich. Parallel werden weitere Zukunftstechnologien entwickelt.
- >> **Langfristig:** Fokus auf Zukunftstechnologien, deren Potenzial heute schon erkennbar, aber eingehender erforscht werden muss.

In allen drei Phasen besteht ein großer Bedarf an Forschung und Entwicklung. Bei Drop-in-Technologien haben diese Bemühungen naturgemäß einen stärker angewandten, bei Zukunftstechnologien einen stärker grundlagenorientierten Charakter. Vor allem die auf Zukunftstechnologien ausgerichteten Forschungsaktivitäten sollten viele unterschiedliche Ansätze verfolgen: So lassen sich im Lauf der Zeit die besten Lösungen erkennen.

Auf jeder Transformationsstufe des Energiesystems kann die thermochemische Energieumwandlung auf Basis chemischer Energieträger einen wesentlichen Beitrag leisten.

---

<sup>7</sup> Grüner Wasserstoff ist Wasserstoff, der per Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien oder aus Biomasse hergestellt wird. Blauer Wasserstoff ist klimaneutraler Wasserstoff aus Erdgas mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung.

---

## DIE KOSTEN

Derzeit ist die Nutzung von Strom, Kraftstoffen und anderen Arten von Endenergie vergleichsweise günstig. Ein wesentlicher Grund dafür: Noch kostet es in vielen Ländern wenig bis gar nichts, klimaschädliche Gase, die etwa bei der Nutzung fossiler Energieträger freiwerden, in der Erdatmosphäre zu deponieren. Das wird sich in Zukunft ändern, denn eine global angestrebte CO<sub>2</sub>-neutrale und weitgehend CO<sub>2</sub>-freie Wirtschaftsform und Lebensweise bringt deutlich höhere Kosten mit sich. Diese entstehen bei der Rückgewinnung und Lagerung des Treibhausgases aus der Atmosphäre oder bei dessen Rückhaltung aus Abgasströmen in Industrie und Verkehr. Auch erneuerbare Energien gibt es nicht zum Nulltarif: Es fallen zum Beispiel beträchtliche Infrastrukturkosten für Photovoltaik- und Windkraftanlagen, Transport und Umwandlung in Endenergie an. Diese realen Kosten von Energieumwandlungsprozessen gilt es künftig in Rechnung zu stellen – möglichst im Rahmen international geltender Vereinbarungen.

**Für eine erfolgreiche Energiewende sollten alle technologischen Optionen vorbehaltlos geprüft werden – unter Berücksichtigung ihrer langfristigen Umweltverträglichkeit, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit.**

Eine zuverlässige Abschätzung der Kosten, Risiken und Chancen des Transformationsprozesses ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Zu diesem Ergebnis kommt auch die dena-Studie [De18]. Das geeignete Instrument für eine solche Schätzung wäre ein mathematisch-thermodynamisch-ökonomisches Modell, das den gesamten Lebenszyklus von Technologien in einzelnen Sektoren und deren Kopplung in Szenarien beschreibt. Noch fehlen jedoch wichtige Daten und Erkenntnisse, um ein verlässliches Modell zu erstellen.

---

Wenn Modelle derzeit kaum bei der Entscheidung für ein bestimmtes Technologieszenario helfen, bietet es sich an, verschiedene Technologiepfade zu beschreiten und unterschiedliche Energieträger und Energieumwandlungstechnologien gleichzeitig zu erproben. Dieses Vorgehen wird in der dena-Studie als technologieoffen bezeichnet. Die Entscheidung für oder gegen einen bestimmten Technologiepfad wird durch die Forschungsergebnisse bestimmt und somit in die Zukunft verlagert. Was aber heute schon feststeht, sind die Kriterien, denen die Ansätze genügen müssen: Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit im gesamten Lebenszyklus (Cradle to Grave<sup>8</sup>).

Thermochemische Energieumwandlungstechnologien haben den Vorteil, dass ihre Zuverlässigkeit nachgewiesen ist und Verteilernetze, Kraftwerke, Wärmeerzeuger, Antriebstechnologien und andere Infrastrukturen vorhanden sind. In der kurzfristig realisierbaren Drop-in-Phase fallen Mehrkosten lediglich bei der Synthese chemischer Energieträger an. Sie entstehen vor allem durch den Ausbau erneuerbarer Energien und deren Umwandlung in chemische Energieträger. Mittel- und langfristig kommen Infrastrukturkosten für den Aufbau neuer, speziell auf die zukünftigen Energieträger abgestimmten Energieumwandlungssysteme hinzu.

## **FAZIT**

Ein gestufter Transformationsprozess im hier beschriebenen Sinne lässt die Endenergiekosten überschaubar anwachsen. Ein massiver Kostenanstieg, der bei abruptem, gleichzeitigem Wechsel von Energieträger und Energieumwandlungstechnologie zu befürchten wäre, wird vermieden.

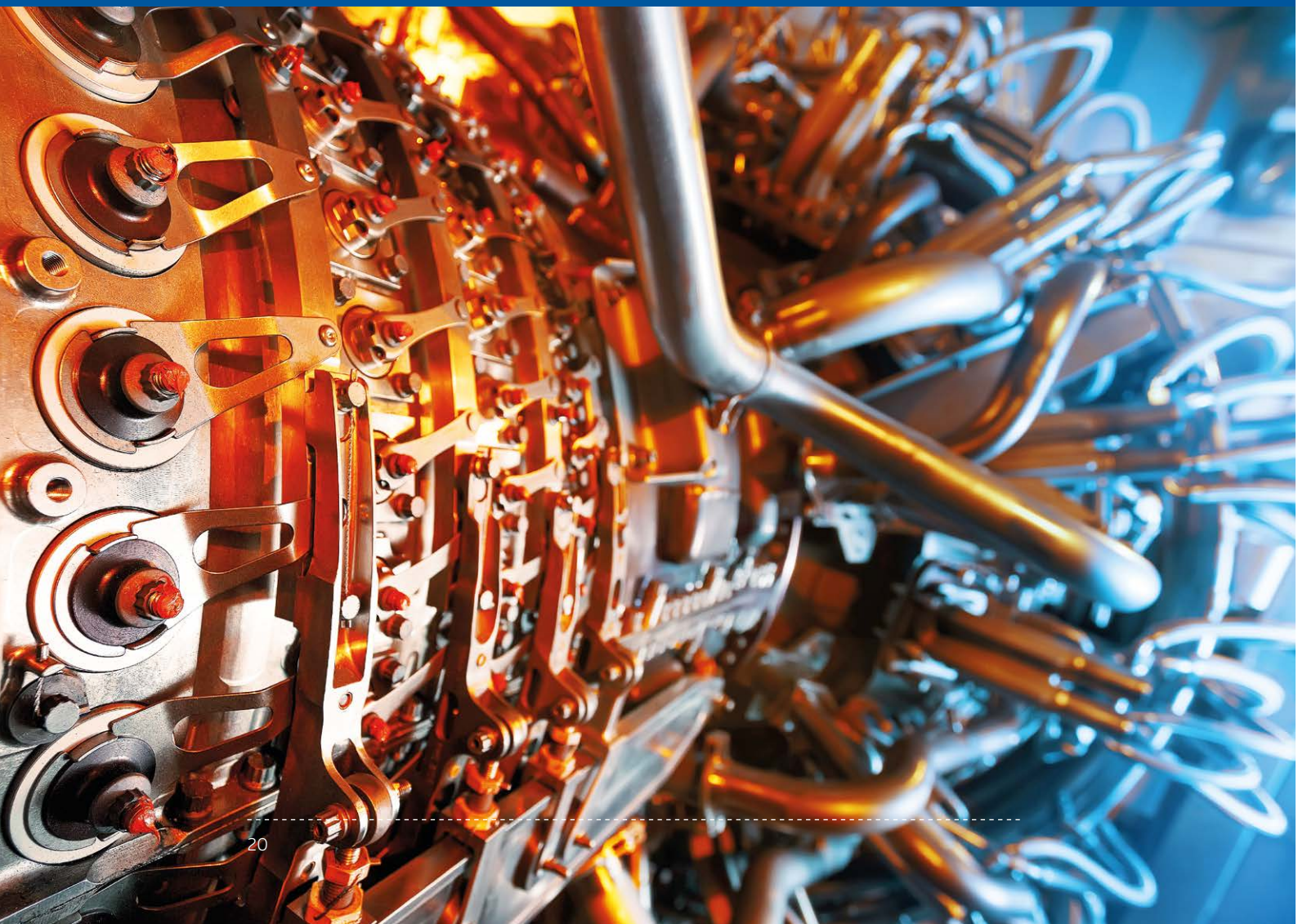
---

<sup>8</sup> Eine Lebenszyklusanalyse berücksichtigt die Gesamtheit aller Umwelteinwirkungen (Cradle to Grave), um eine realistische Bilanz zu ziehen – und letztlich schädliche Anreize zu vermeiden.

---

3.

# Anwendungen



---

Auf den folgenden Seiten geht es um die Bedeutung der thermochemischen Umsetzung von Brennstoffen in den wichtigsten Anwendungsgebieten: Stromversorgung, Mobilität, Industrie und Gebäude. Auf eine kurze Skizze der Ausgangslage folgt eine Prognose der künftigen Relevanz thermochemischer Energieumwandlungsprozesse im jeweiligen Sektor.

## 3.1. Stromversorgung

Praktisch alle neueren wissenschaftsbasierten Studien kommen zu dem Schluss, dass CO<sub>2</sub>-freie Technologien hierzulande vor allem auf regenerativer Stromerzeugung basieren müssen. In die gleiche Richtung weist der politische Konsens, Abbau und Nutzung von Kohle als fossilem Energieträger in Deutschland mit dem Jahr 2038 zu beenden. All dies steht in Einklang mit den Zielen des European Green Deals [EGD] und den Sustainable Development Goals der Vereinten Nationen [SDG].

Schon jetzt trägt die Stromerzeugung aus Wasserkraft und biogenen<sup>9</sup> Brennstoffen deutlich zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Beide Ressourcen stehen jedoch nur begrenzt zur Verfügung. Das ist anders bei Wind und Sonne – sie werden daher künftig eine noch wichtigere Rolle spielen.

Im Jahr 2018 trugen inländische Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen mit einer installierten Leistung von rund 118 Gigawatt (GW) zur Stromversorgung in Deutschland bei. Schätzungen gehen davon aus, dass diese Kapazität, je nach Szenario, künftig auf 250 bis 600 GW erhöht werden muss, um den Bedarf zu decken [De19]. Die Prognosen liegen so weit auseinander, weil sich der Einfluss von Effizienzsteigerungen, Energieeinsparungen, Stromimporten, innovativen Technologien und anderen Faktoren derzeit nicht genau abschätzen lässt.

<sup>9</sup> Gemeint ist heutige Biomasse – im Unterschied zu fossilen Brennstoffen, deren biologische Quellen aus geologischer Vorzeit datieren.

---

## DIE HERAUSFORDERUNGEN

Eine zentrale Herausforderung bei der Nutzung erneuerbarer Energiequellen ist die starke Fluktuation der Stromerzeugung. In eindrucksvoller Weise führen dies die Abbildungen 2 und 3 für einen Jahreszyklus beziehungsweise für einen Monatszyklus vor Augen.

Abbildung 2 stellt für Deutschland die maximalen und minimalen Leistungen aus den fluktuierenden Quellen Wind und Sonne im Jahr 2019 als Stundenmittelwerte dar. Man sieht, dass die Werte zwischen nahezu 0 und knapp der Hälfte der installierten Leistung erneuerbarer Energien von circa 118 GW schwanken. Besonders ausgeprägt sind die Schwankungen in den Wintermonaten. Dann steht nahezu ausschließlich Windenergie zur Verfügung, deren Fluktuation durch Photovoltaik kaum kompensiert werden kann.

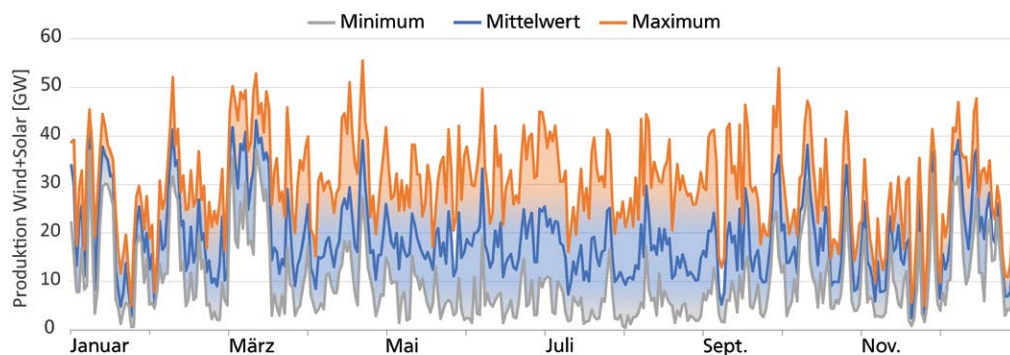


Abb. 2: Stundengemittelte Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik in Deutschland im Jahr 2019. Daten aus [En]. Die Frequenz der Schwankungen ist in den Wintermonaten besonders ausgeprägt.

## DIE ENERGIETRÄGER

Abbildung 3 zeigt den Beitrag der unterschiedlichen Primärenergiequellen zum Strombedarf. Die obere Begrenzung von 80 GW entspricht im Wesentlichen dem maximalen Leistungsbedarf in Deutschland. Aktuell wird er durch Wasserkraft, biogene Quellen, Kernenergie, Kohle, Gas sowie Wind und Sonne gedeckt. Die Abbildung lässt eine starke tageszeitliche Abhängigkeit sowie eine ausgeprägte witterungsbedingte Fluktuation erkennen. Es gibt Phasen mit hohen Anteilen erneuerbarer Energie: Im Winter ist dies hauptsächlich hei-

mische Windenergie, im Sommer zusätzlich Solarenergie. Es treten aber auch längere Phasen auf, in denen weder Wind noch Sonne zur Verfügung stehen.

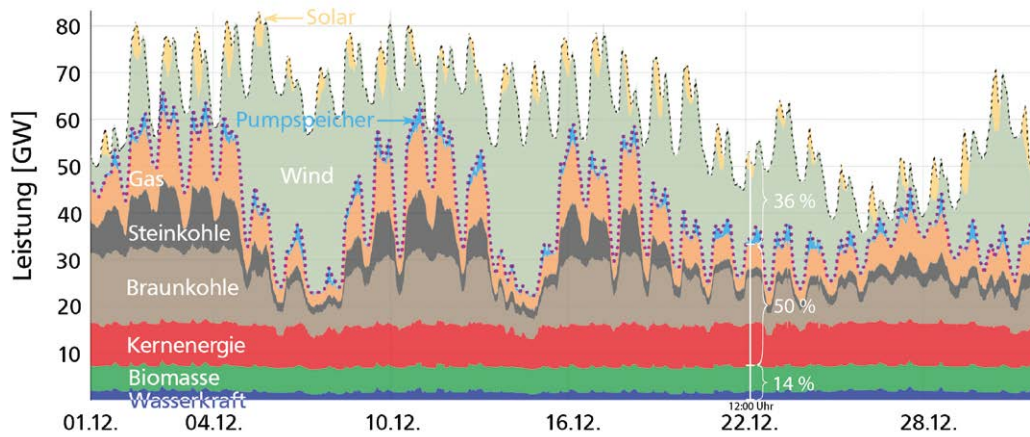


Abb. 3: Stromerzeugung aus unterschiedlichen Quellen und zeitlich fluktuierender maximaler Leistungsbedarf (obere, graue Punktlinie) im Dezember 2019 in Deutschland; reproduziert nach [Ent]. Der Öl-Anteil ist wegen seiner Geringfügigkeit nicht dargestellt. Die untere gepunktete Linie (magenta) markiert den Leistungsbeitrag von Wasserkraft, Biomasse, Kernenergie, Stein- und Braunkohle, Gas sowie Pumpspeicher. Die Differenz zur zeitlich fluktuierenden Gesamtleistung ergibt den Anteil von Wind- und Sonnenenergie. Das Beispiel für den 22. Dezember 2019 zur Mittagszeit weist einen Anteil von Wind- und Solarenergie von circa 36 Prozent aus.

Die Fluktuationen erneuerbarer Energiequellen bedürfen einer Kompensation. Kurzfristige Schwankungen im Minuten- bis Halbstunden-Bereich in der Größenordnung von 10 bis 50 Gigawattstunden (GWh) können durch Pumpspeicher, Druckluftspeicher und weitere teils schon vorhandene Technologien ausgeglichen werden (Abb. 1). Demand Control und weitere Innovationen werden künftig zu noch umfassenderen Lösungen beitragen. So lassen sich mit Carnotbatterien und anderen Batterietypen voraussichtlich mittelgroße Schwankungen über einige Stunden hinweg kompensieren, und zwar bis zu einer Energiemenge von einigen hundert GWh. Für die Kompensation von Schwankungen durch tagelange wind- und sonnenarme Perioden, sogenannte kalte Dunkelflauten<sup>10</sup>, und Versorgungslücken von einigen Tausend GWh, kommen jedoch nur chemische Energieträger infrage. Die chemischen Energieträger der Zukunft müssen aus regenerativen Energiequellen erzeugt werden, deren Rückverstromung regelbare Kraftwerke<sup>11</sup> erfordert.

<sup>10</sup> Über mehrere Tage anhaltende Perioden, in denen stark unterdurchschnittlich viel Strom aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen eingespeist wird. Bei zusätzlich kalter Witterung ist der Elektrizitätsbedarf besonders hoch.

<sup>11</sup> Neben thermischen Kraftwerken kommen dafür künftig auch Brennstoffzellentechnologien infrage.

---

Die Standorte zur Herstellung chemischer Energieträger aus Sonnen- und Windenergie müssen so ausgewählt werden, dass Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit gewährleistet sind. Heimische Standorte für Windkraft und Photovoltaik finden immer weniger Akzeptanz und die Anlagen können aus Witterungsgründen nur relativ selten unter Vollast betrieben werden, was ihre Wirtschaftlichkeit schmälert.

## GRENZÜBERSCHREITENDE KOOPERATION

Standorte im Ausland in Erwägung zu ziehen, etwa in Südeuropa und Nordafrika, ist daher aus heutiger Perspektive eine sinnvolle Option. In diese Richtung weist auch die Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung [BM20]. In südlichen Regionen könnte, so die Vision, erneuerbar erzeugter Strom in geeigneten chemischen Energieträgern gespeichert und nach Deutschland importiert werden, um sie hier in klassischen thermischen Kraftwerken zu verstromen. Besonders geeignet sind dafür Gas-und-Dampf (GuD)-Kombikraftwerke. Wie sich ein hoher Wirkungsgrad über die gesamte Prozesskette erzielen lässt<sup>12</sup> und wie eine zuverlässige Vor-Ort-Produktion der Energieträger gelingen kann, wird derzeit in Fachkreisen diskutiert.

Das hier skizzierte Szenario könnte den Leistungsdruck, der auf der inländischen Stromproduktion aus erneuerbaren Quellen lastet, verringern. Es trägt nicht nur zur Kompensation von Grundlast- und Regelkapazitäten von bis zu 65 GW bei, die durch Atom- und Kohleausstieg wegfallen, es kann auch bei der Deckung des in aktuellen Studien [De18] prognostizierten hohen Bedarfs an erneuerbaren Energien helfen. In den Vorhersagen beläuft sich der Bedarf für den Fall einer rein inländischen Produktion auf bis zu 600 GW installierter Leistung, was einer Verfünffachung der jetzigen Kapazitäten entspräche. Realisieren lässt sich ein derart diversifiziertes Energiesystem selbstverständlich nur unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren – sie sind sowohl technischer, wirtschaftlicher als auch sozialer und politischer Natur.

---

<sup>12</sup> Bei Verwendung von grünem Wasserstoff (siehe Fußnote 7) beträgt der Wirkungsgrad der gesamten Prozesskette einschließlich des Transports circa 28 Prozent. Für diese Abschätzung wurden gemäß [Ac17] für den Transport über kurze und lange Distanzen jeweils 95 Prozent Effizienz, für die Elektrolyse 70 Prozent, für Power-to-Liquid 70 Prozent und für den GuD-Prozess 63 Prozent [Ge17] angenommen.



## DIE KRAFTWERKE

Zur Kompensation kalter Dunkelflauten – sie treten in nahezu jedem Jahr für einige hundert Stunden<sup>13</sup> auf – ist eine witterungsunabhängige Kraftwerkskapazität von mindestens 80 GW notwendig<sup>14</sup>. Diese Einschätzung teilen alle relevanten Studien. Abbildung 4 zeigt in Abhängigkeit unterschiedlicher Szenarien aus drei Studien [De18, Ac15, Ac17] einen Bedarf regelbarer Kraftwerkskapazität zwischen 80 und 140 GW, der in der Größenordnung der gegenwärtigen Kraftwerkskapazität von circa 100 GW liegt.

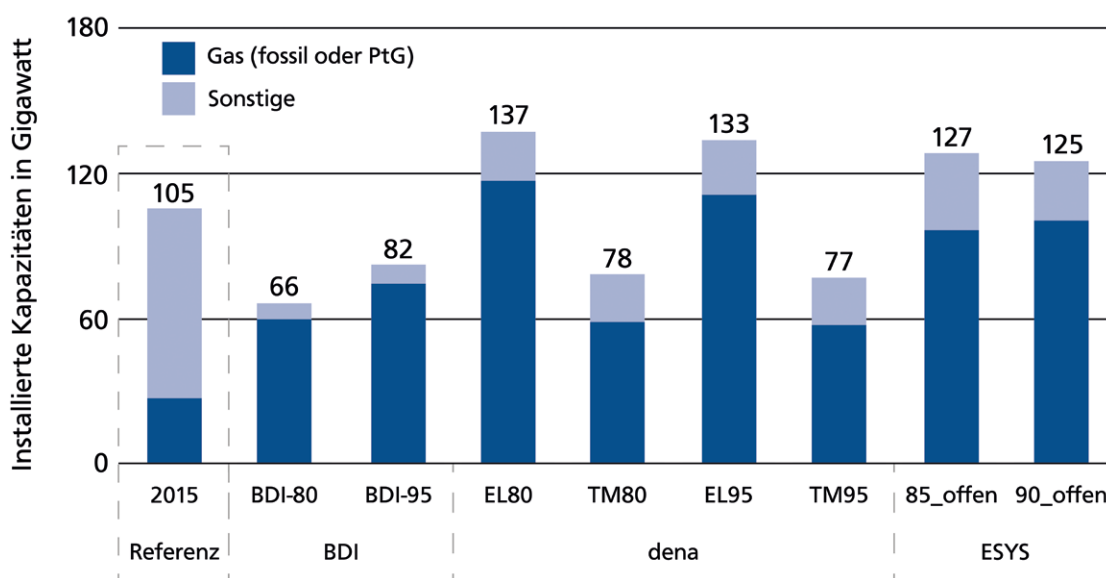


Abb. 4: Szenarien für den Bedarf an regelbaren Kraftwerkskapazitäten in Deutschland im Jahr 2050, reproduziert nach [De19]. Dort werden die Szenarien auch detailliert erläutert.

<sup>13</sup> Ein Beispiel: In der Zeit vom 16. bis zum 25. Januar 2017 herrschte in Deutschland nahezu flächendeckend eine neblige Windstille. Windenergie- und Solaranlagen mit einer gemeinsamen installierten Leistung von 91 GW speisten damals nur etwa 4,6 GW ins Stromnetz ein – der Strombedarf betrug jedoch circa 63,1 GW. (Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestags, Aktenzeichen WD 5-3000 -167/18 (2019))  
Der Bericht bezieht sich auf folgende Webseite: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/dunkelflaute>

<sup>14</sup> Diese Kapazität ist erforderlich, unabhängig davon, wie häufig sie benötigt wird.

---

In Deutschland werden dieser Aufgabe nach Atom- und Kohleausstieg derzeit nur Gasturbinenkraftwerke, Gas-und-Dampf-Kombikraftwerke mit hohen Wirkungsgraden von bis zu 63 Prozent [Ge17] und Gasmotoren gerecht. Für diese Lösung sprechen vor allem folgende Gründe:

- >> Die Anlagen sind lastflexibel und können innerhalb weniger Minuten auf Fluktuationen der Stromerzeugung aus regenerativen Quellen reagieren.
- >> Selbst ein kurzfristig stark erhöhter Bedarf kann zuverlässig durch den Einsatz von Erdgas gedeckt werden. In einer ersten Phase würde man vor allem fossiles Erdgas verwenden. Es erlaubt eine Stromerzeugung mit CO<sub>2</sub>-Emissionen, die rund 60 Prozent [WD07] unter denen von Braunkohlekraftwerken liegen<sup>15</sup>.
- >> Fossiles Erdgas kann in einem kontinuierlichen Transformationsprozess vollständig durch synthetisches Erdgas aus regenerativen Quellen ersetzt werden. Angesichts der vorhandenen, leistungsfähigen Gasinfrastruktur ist das ein erheblicher strategischer Vorteil.
- >> Fossiles Erdgas lässt sich kurzfristig mit grünem Wasserstoff aus regenerativen Quellen anreichern. Für einen kontinuierlichen Transformationsprozess ist dies von großer Bedeutung.
- >> Nach entsprechender Weiterentwicklung bestehender Gasturbinentechnologie [Dv] kann fossiles Erdgas langfristig ganz durch grünen Wasserstoff ersetzt werden.

## PERSPEKTIVEN FÜR DIE ZUKUNFT

Die in Kapitel 2 beschriebenen Phasen des Transformationsprozesses lassen sich mithilfe der Gasturbinentechnologie zuverlässig und mit überschaubarem Risiko realisieren. Bis zu einem Anteil von circa 20 Volumenprozent Wasserstoff im Erdgas ist sogar ein stufenloser Technologiewechsel möglich [Tr20]. Bei einem höheren Wasserstoffanteil im (synthetischen) Erdgas muss die heutige Gasturbinentechnologie weiterentwickelt werden, um den besonderen physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wasserstoffs zu genügen.

---

<sup>15</sup> Die Nutzung von Erdgas erfordert eine Verringerung des Methan-Schlupfs. Das ist der Anteil des bei Produktion, Transport und Nutzung in die Atmosphäre emittierten Methans; englisch: Fugitive Emission Rate. Im Jahr 2013 betrug die globale mittlere Fugitive Emission Rate nach [Sc16] circa 2,3 Prozent.

---

Zusätzlich sollte mittelfristig in Erwägung gezogen werden, CO<sub>2</sub> entweder durch sicheres Deponieren dem Kreislauf zu entziehen (Carbon Capture and Storage, CCS<sup>16</sup>) oder stofflich weiter zu nutzen (Carbon Capture and Utilization, CCU, was eine besonders sinnvolle Option für eine zukünftige Kreislaufwirtschaft ist). Das zurückgehaltene Treibhausgas lässt sich beispielsweise zur Synthese kohlenstoffhaltiger synthetischer Brennstoffe verwenden. In Kombination mit der Nutzung von Biomasse oder von synthetischen Kohlenwasserstoffen, die mit atmosphärischem CO<sub>2</sub> produziert wurden, können sogar negative CO<sub>2</sub>-Emissionen erzielt werden. Diese sind nach Einschätzung des Weltklimarats IPCC [IP15] zur Erreichung des 1,5-Grad-Ziels erforderlich.

Langfristig dürften chemische Energieträger aus erneuerbaren Quellen einen vollständig kohlenstofffreien Zyklus unter Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Atmosphäre ermöglichen. Wenn das gelingt, muss CO<sub>2</sub> nicht mehr aus der Atmosphäre oder dem Abgasstrom zurückgewonnen werden – eine vollständig CO<sub>2</sub>-freie Stromerzeugung stünde in Aussicht.

Neben dem oben diskutierten regenerativ erzeugten grünen Wasserstoff kommen weitere chemische Energieträger in Betracht. Dazu zählen Wasserstoff-Ammoniak-Mischungen, Ammoniak, Metalle wie Eisen, Halbmetalle wie Silizium und Nichtmetalle wie Schwefel. Diese Energieträger liegen in flüssiger oder fester Phase vor und besitzen höhere volumetrische Energiedichten als gasförmiger Wasserstoff oder synthetisches Erdgas. Das erleichtert den Transport über weite Distanzen, etwa aus sonnen- und windreichen Regionen nach Deutschland.

Das Potenzial von Metallen, Halbmetallen und Nichtmetallen als chemische Energieträger für die großtechnische Anwendung erscheint reizvoll, ist aber noch wenig untersucht. Daher ist die Nutzung solcher relativ häufig in der Erdkruste vorkommenden Feststoffe mit höheren technologischen Risiken verbunden als die Nutzung von grünem Wasserstoff. Hier ergeben sich lohnende Fragestellungen für künftige Forschung und Entwicklung.

---

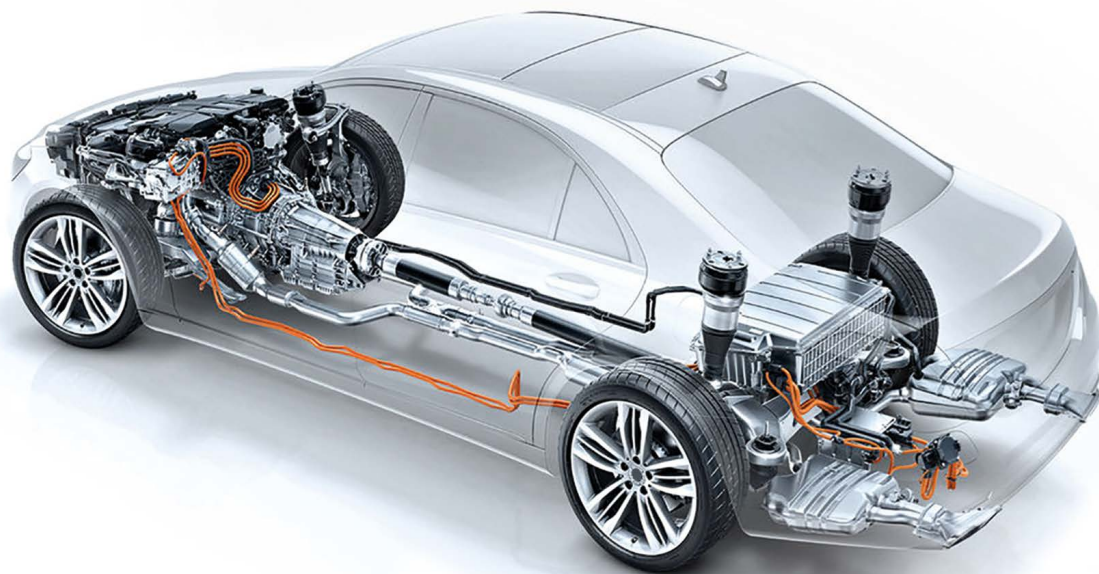
<sup>16</sup> Das CCS-Verfahren wird von der US National Academy of Engineering als eine der 14 Grand Challenges for Engineering geführt [Gc].

---

## 3.2. Mobilität

Um die Klimaziele kostensparend zu erreichen ist es ratsam, mehrere Mobilitätstechnologien parallel weiterzuentwickeln. In Übereinstimmung mit aktuellen Studien (zum Beispiel [Ac17]) sind dabei, zumindest in Deutschland, folgende Empfehlungen unstrittig:

- >> Für kurze Distanzen im Landverkehr sind batteriebetriebene Fahrzeuge eine gute Lösung. Dies gilt sowohl für den Lieferverkehr als auch im Individualverkehr, wenn die Ziele sich nicht zu Fuß, per Fahrrad oder mit öffentlichen Nahverkehrsmitteln erreichen lassen. Grund sind die hohen Wirkungsgrade von circa 70 Prozent bei der Umwandlung von erneuerbar erzeugter Elektrizität in Antriebsenergie [Ac17]. Die noch zu lösenden infrastrukturellen, politischen und technologischen Herausforderungen für einen flächendeckenden Einsatz werden nachfolgend beschrieben.
- >> Für mittlere und große Distanzen im Landverkehr, die nicht durch elektrifizierten Bahnverkehr abgedeckt werden, braucht man chemische Energieträger mit hoher Energiedichte. Diese Verkehrssysteme können über erneuerbar erzeugte Brennstoffe mittelfristig CO<sub>2</sub>-Neutralität erreichen. Durch sukzessiv gesteigerte Zumischung von synthetischen zu fossilen Brennstoffen ist eine stufenlose Transition grundsätzlich möglich.
- >> Für weite Distanzen im Schiffs- und Luftverkehr werden ebenfalls chemische Energieträger mit hoher Energiedichte benötigt. Besonders attraktiv sind flüssige Brennstoffe. Die sukzessive Zumischung von synthetischen zu fossilen Brennstoffen erlaubt auch hier eine stufenlose Transition hin zur CO<sub>2</sub>-neutralen Mobilität.



Hybridantrieb mit Elektro- und Verbrennungsmotor. Sie können bei Nutzung synthetischer Kraftstoffe zu einer flexiblen, CO<sub>2</sub>-neutralen Mobilität beitragen.

## VORHANDENE TECHNOLOGIEN

Zur Umsetzung dieser Empfehlungen stehen heute bereits mehrere Technologien zur Verfügung. Die wichtigsten sind:

- >> batteriegetriebene Fahrzeuge,
- >> Brennstoffzellenfahrzeuge,
- >> Verkehrsmittel, ausgerüstet mit Kolbenmotoren und Gasturbinen, die mit synthetischen Brennstoffen betrieben werden,
- >> Hybridfahrzeuge mit einer Kombination dieser Antriebe sowie
- >> elektrifizierter schienengebundener Verkehr.

Im Schwerlastverkehr kommen, falls derzeit laufende Versuche [Si] erfolgreich verlaufen, möglicherweise stromgetriebene Oberleitungshybrid-Lkws hinzu.

---

## BLICK IN DIE ZUKUNFT

Eine Vorhersage, welche Technologien sich langfristig durchsetzen und ob einzelne von ihnen den Markt dominieren werden, ist heute kaum möglich. Dafür gibt es zu viele Unsicherheiten hinsichtlich Infrastruktur, Technologieentwicklung und politischer Rahmenbedingungen.

Infrastrukturelle und politische Fragen betreffen den Aufbau von Verteilernetzen für elektrische Energie und Wasserstoff. Ohne Ladestationen, Tankstellen, straßengebundene Oberleitungen und andere Infrastrukturen werden die neuen Technologien keine Käufer finden. Es handelt sich um ein Henne-Ei-Problem: Benötigt wird ein gut ausgebautes Verteilernetz, um die neue Option für potenzielle Nutzer attraktiv zu machen – wirtschaftlich betreiben lässt sich das teure Netz aber nur dann, wenn viele Kunden es nutzen. Der Transformationsprozess ist demnach mit erheblichen Risiken verbunden.



Für Langstreckenflüge sind chemische Energieträger mit hoher Energiedichte unverzichtbar.

---

Bei den technologischen Fragen geht es etwa um Lebensdauer und Langzeitzuverlässigkeit von Batterien und Brennstoffzellen, umweltverträgliche Methoden zur (Rück-)Gewinnung seltener Materialien und Betriebssicherheit. Hier sind vor allem Forschung und Entwicklung gefordert.

Gasturbinen für den Flugverkehr sowie Kolbenmotoren, zunehmend in Kombination mit Elektroantrieben für Hybridfahrzeuge, werden auch künftig eine große, aber noch nicht abschließend bewertbare Bedeutung haben. Denn die energietechnische Nutzung kohlenstoffhaltiger chemischer Energieträger kann durchaus CO<sub>2</sub>-neutral und die von kohlenstofffreien chemischen Energieträgern sogar CO<sub>2</sub>-frei erfolgen. Die Herausforderung besteht darin, die thermochemischen Energieumwandlungsprozesse effizient, schadstoffarm und zügig zu gestalten. Das wird nur mithilfe eines breit angelegten Forschungsansatzes gelingen, in dem experimentelle Untersuchungen mit theoretischen Analysen und numerischen Simulationen kombiniert werden. Kaum Probleme gibt es bei diesen Motoren hinsichtlich Lebensdauer und Langzeitzuverlässigkeit.

**Kurzfristig** können kohlenstoffhaltige synthetische Brennstoffe mit fossilen Brennstoffen gemischt und ein stufenloser Transformationsprozess auf Basis bestehender Infrastruktur realisiert werden. Dies gilt nicht nur für flüssige Brennstoffe wie zum Beispiel E-Fuels als Ersatz für Diesel, Benzin und Kerosin aus fossilen Quellen, sondern auch für gasförmige Brennstoffe wie Wasserstoff oder synthetisches Erdgas. Durch den vermehrten Einsatz von komprimiertem synthetischem Erdgas in mobilen Gasmotoren lassen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen effektiv senken – ähnlich wie bei stationären Gasturbinen zur Stromerzeugung. Allerdings muss der Ausstoß von besonders klimaschädlichem unverbranntem Methan noch weiter reduziert werden.

**Mittel- und langfristig** könnte sich die Notwendigkeit ergeben, zusätzlich kohlenstofffreie chemische Energieträger zu nutzen. Aus jetziger Sicht sind Wasserstoff und möglicherweise auch Wasserstoff-Ammoniak-Mischungen vielversprechende Optionen. Die Nutzung von Ammoniak als effektiver Wasserstoffspeicher ist aufgrund der hohen volumetrischen Energiedichte vor allem für die mobile Anwendung interessant. Dieses Potenzial wird zum Beispiel bei der Entwicklung erster Ammoniak-Schiffsmotoren [La18] genutzt. Noch sind grundlegende Fragen zu Prozessführung und Schadstoffbildung offen. Auch die notwendigen grenzüberschreitenden Infrastrukturen zur Verteilung kohlenstofffreier chemischer Energieträger existieren noch nicht.

---

## 3.3. Industrie

Im industriellen Bereich ist die Wirtschaftlichkeit von Klimaschutzmaßnahmen von besonderer Bedeutung. Das hat mit der Exportabhängigkeit Deutschlands und dem enormen globalen Wettbewerbsdruck in der Industrie zu tun.

Viele Studien plädieren dafür, den aktuell hohen Anteil fossiler Energieträger in diesem Sektor behutsam zu reduzieren. Die Mehrzahl der Szenarien geht sogar von einer unterproportionalen CO<sub>2</sub>-Reduktion im Industriebereich aus. Vorgeschlagen wird, das Ungleichgewicht durch höhere Reduktionen in den Sektoren Mobilität und Gebäude auszugleichen.



Wie hier in der Stahlproduktion sind in vielen Industriebereichen behutsame Strategien zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen erforderlich.

Eine Besonderheit des Industriesektors ist seine ausgeprägte Heterogenität und die lange Lebensdauer der Anlagen. Jede Branche hat ihre charakteristischen Verfahren. Das gilt für die Produktion oder Verarbeitung von Eisen und



---

Stahl, Aluminium und Kupfer, Steine und Erden, Glas und Keramik ebenso wie etwa für die chemische Industrie. Eine CO<sub>2</sub>-Reduktion in diesen Branchen ist nur möglich, wenn ihre spezifischen Verfahren entsprechend verändert werden. Doch es gibt einige übergeordnete Maßnahmen, die in vielen Bereichen Anwendung finden können:

- >> Der Ersatz von Kohle und Öl durch Erdgas und Wasserstoff – zunächst aus fossilen, künftig vermehrt aus erneuerbaren Quellen, wobei der Methan-Schlupf weiter reduziert werden muss.
- >> Der verstärkte Einsatz von Recyclingstrategien sowie der Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff/Reduktionsmittel und die Einbindung von regenerativ erzeugtem Strom. Diese Entwicklung prognostizieren aktuelle Studien vor allem für die Bereiche Eisen und Stahl, Aluminium und Kupfer.
- >> Die Nutzung von CCS- und CCU-Verfahren für ausgewählte Technologien.
- >> Die Verwendung von Biomasse und thermisch verwertbaren Abfällen. Diese Strategie wird in einigen Studien zur Senkung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Industriesektor empfohlen.

In besonders energieintensiven Hochtemperaturprozessen sind thermochemische Verfahren schwer zu ersetzen. Das gilt für Bereiche wie Glas und Keramik, Steine und Erden oder für die Acetylenherstellung in der Verfahrenstechnik. Diese Prozesse reagieren äußerst sensitiv auf kleinste Änderungen, weshalb Technologieänderungen erfahrungsgemäß nur sehr zögerlich vorgenommen werden. Das in diesen Prozessen häufig eingesetzte fossile Erdgas sollte sich jedoch kurz- und mittelfristig durch synthetisches Erdgas (teils in Mischung mit Wasserstoff) ersetzen lassen.

## **FAZIT**

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Industriebereich auch in Zukunft in hohem Maße auf chemische Energieträger in Kombination mit thermochemischen Energieumwandlungsprozessen angewiesen sein wird. Die Aufgabe besteht nun darin, den Wirkungsgrad von CO<sub>2</sub>-geminderten Prozessen zu erhöhen, brennstoffflexible Brennertechnologien bereitzustellen und die Emission von Luftschadstoffen zu senken.

---

## 3.4. Gebäude

In punkto Klimafreundlichkeit gibt es im Gebäudesektor viel Nachholbedarf, aber auch großes Potenzial. Den stärksten Schub versprechen eine erhöhte Energieeffizienz<sup>17</sup> und der vermehrte Einsatz erneuerbarer Energien.

Die dena-Studie [De18] geht davon aus, dass ein technologieoffener<sup>18</sup> und integrierter Ansatz, bei dem die Gebäudehülle und -technik als Einheit optimiert werden, am wirtschaftlichsten ist. Es werden Maßnahmenpakete vorgeschlagen, die im Wesentlichen aus diesen Komponenten bestehen:

- >> verbesserte Isolierung von Bestandsgebäuden (als Folge einer deutlichen Erhöhung der jährlichen Sanierungsrate),
- >> verbesserte Effizienz bestehender Gebäudetechnik (als Folge einer deutlichen Erhöhung der jährlichen Austauschrate von Altanlagen),
- >> verstärkte Nutzung von Wärmepumpen, die über regenerativ erzeugten Strom betrieben werden,
- >> Nutzung von synthetischen Brennstoffen, insbesondere auch in Hybrid-Anlagen wie beispielsweise Strom-Gas-Hybridheizungen und Gas-Solarthermie-Hybridheizungen sowie
- >> Nutzung klimafreundlicher Baustoffe.

In Form von synthetischen Brennstoffen spielen chemische Energieträger demnach auch im Gebäudesektor der Zukunft eine wichtige Rolle – vor allem in Szenarien mit niedrigen Gesamtkosten und in Kombination mit anderen Technologien. Die effiziente thermochemische Energieumwandlung chemischer Energieträger in Gebäuden ist fest etabliert, man denke nur an die Brennwertechnik. Sie wird auch künftig wichtig sein, um die Klimabilanz von Bestandsimmobilien zu verbessern.

<sup>17</sup> Neue Gebäude müssen nach der Energieeinsparverordnung errichtet werden. Stark senken lassen sich die Treibhausgasemissionen auch durch die Sanierung des Gebäudebestands.

<sup>18</sup> Das technologieoffene Szenario geht von einem Mix aus, der ausdrücklich auf eine große Variation bei Technologien und Energieträgern setzt. Effizienzsteigerungen und synthetische Brennstoffe kommen darin besondere Bedeutung zu.



Durch bessere Isolierung und moderne Gebäudetechnik lässt sich die Energieeffizienz von Altbauten deutlich steigern. Darüber hinaus kann auch die sukzessive Zumischung von grünem Wasserstoff ins Erdgasnetz die CO<sub>2</sub>-Emissionen älterer Gebäude senken.

Bald schon werden sich CO<sub>2</sub>-Emissionen von älteren Gebäuden weiter senken lassen. Möglich wird das durch sukzessive Zumischung von synthetischem Erdgas und grünem Wasserstoff im Erdgasnetz und von synthetisch erzeugtem Heizöl als Substitut von Heizöl fossilen Ursprungs. Dafür sind keine Änderungen an der bestehenden Infrastruktur erforderlich – Leitungen, Anlagen und Heiztechnik können wie bisher weitergenutzt werden.

Für die Zukunft gilt es, die Brennstoffflexibilität der Anlagen zu erhöhen und die Emission von Schadstoffen, darunter Stickstoffoxide und Kohlenstoffmonoxid, bei gleichbleibend hoher Effizienz weiter zu senken.

#### **FAZIT**

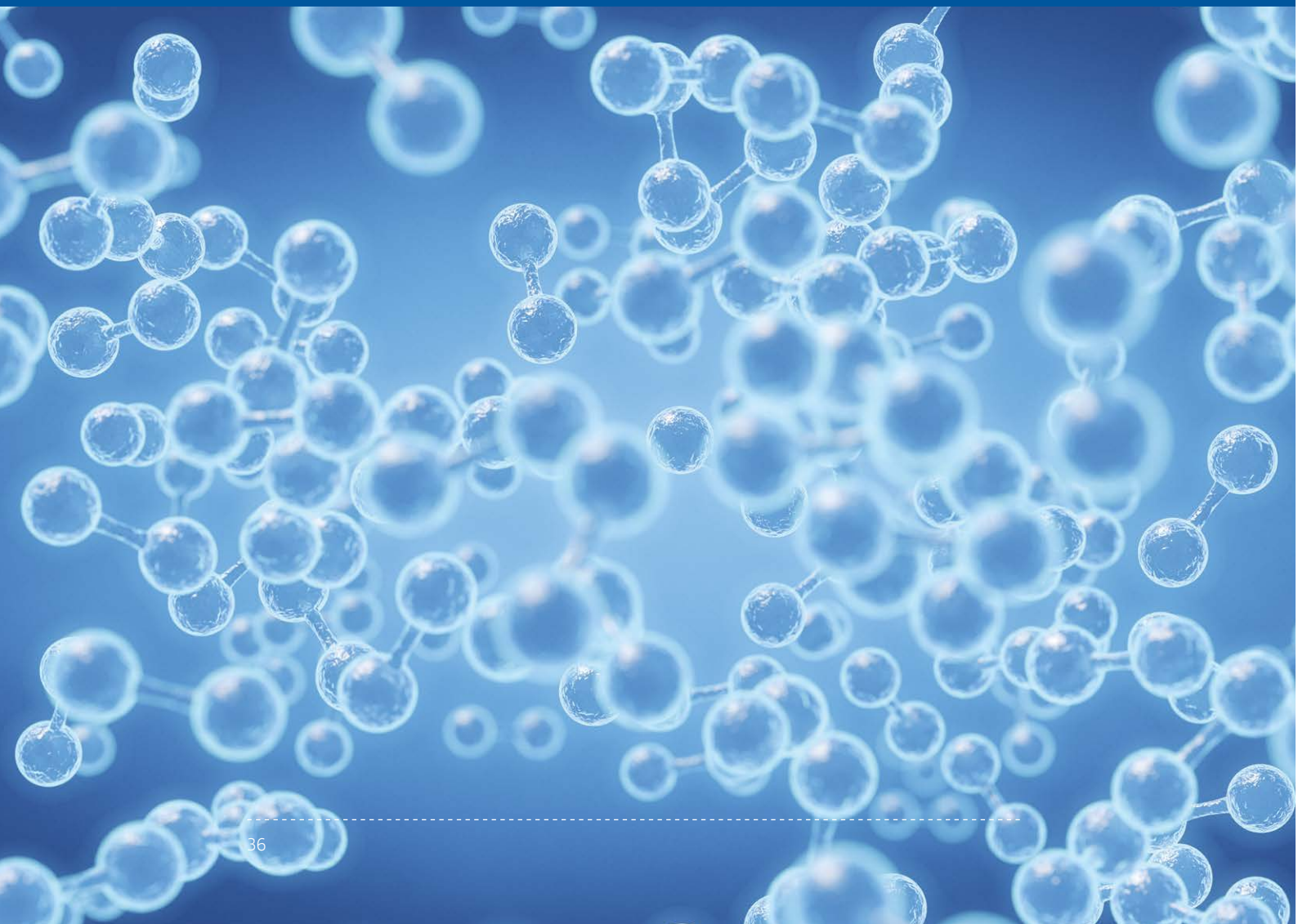
Auch im Gebäudesektor spielen synthetische Brennstoffe und thermochemische Energieumwandlungsverfahren eine bedeutende Rolle, vor allem in Kombination mit anderen Technologien und bei der energetischen Sanierung älterer Gebäude.

---

4.

---

# Forschung



---

Warum synthetische chemische Energieträger als Speicher erneuerbarer Energien für die Energiewende unerlässlich sind, wurde in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich erläutert. Um eine möglichst schnelle Transformation in eine nachhaltige Energie- und Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen, ist ein technologieoffener Forschungsansatz notwendig. Dieser sollte die Produktion chemischer Energieträger auf der Basis erneuerbarer Energien sowie elektro- und thermochemische Energieumwandlungsprozesse gleichermaßen umfassen.

Im vorliegenden Positionspapier wird die Bedeutung thermochemischer Energieumwandlungsprozesse diskutiert, weswegen auch im Folgenden der Fokus nur auf diesen Verfahren liegt. Um hier die vielversprechendsten Ansätze zu finden und zu entwickeln, sind verstärkt Anstrengungen in Grundlagenforschung und angewandter Forschung notwendig. Dabei stehen folgende Themen im Vordergrund:

- >> Verfahren zur Nutzung kohlenstoffhaltiger und kohlenstofffreier chemischer Energieträger, die mithilfe von regenerativ erzeugtem Strom synthetisiert werden, sowie CO<sub>2</sub>-Rückhaltetechnologien und Methoden zur Erhöhung der Prozesswirkungsgrade,
- >> Reduktion der Schadstoffbildung bei thermochemischer Nutzung synthetischer chemischer Energieträger, vor allem unter zeitlich veränderlichen Betriebsbedingungen und neuen Brennstoffzusammensetzungen,
- >> einander ergänzende theoretische und experimentelle Untersuchungen von einzelnen und gekoppelten Reaktions-Transportprozessen, welche die Effizienz und Umweltfreundlichkeit thermochemischer Energieumwandlungsprozesse maßgeblich beeinflussen sowie die
- >> konsequente Weiterentwicklung von numerischen Simulationsmethoden unter Verwendung physikalisch konsistenter mathematischer Modelle, die eine stringente Einbindung in digitalisierte Entwicklungsprozesse ermöglichen. Dies erfordert grundlegende Experimente zur Modellbildung und Validierung.

---

## IN GREIFBARER NÄHE

Auch bei der thermochemischen Nutzung kohlenstoffhaltiger chemischer Energieträger, darunter synthetisches Erdgas und flüssige synthetische Brennstoffe, wird CO<sub>2</sub> freigesetzt. Dennoch lässt sich die Klimabilanz dieser aus erneuerbaren Energien hergestellten Energieträger neutral gestalten, zumindest im stationären Bereich. Dafür besonders geeignet sind CCS- und CCU-Technologien, mit deren Hilfe sich das von Kraftwerken emittierte Treibhausgas aus dem Abgasstrom entfernen lässt. CCS- und CCU-Technologien werden in Pre-Combustion Capture, Post-Combustion Capture, Oxyfuel- und Chemical Looping-Verfahren unterschieden. Das im mobilen Bereich emittierte CO<sub>2</sub> hingegen muss, um Klimaneutralität zu erreichen, mit beträchtlichem Aufwand wieder aus der Atmosphäre herausgeholt werden.

Die zukünftige Anwendung dieser Verfahren erfordert, etwa bei der energetisch besonders effizienten Oxyfuel-Methode, ein deutlich verbessertes Prozessverständnis [Yi16]. Noch ist unklar, wie die Oxidationsatmosphäre im Brennraum die chemischen Reaktions- und physikalischen Transportprozesse im Unterschied zur klassischen Luftfeuerung verändert. Hierfür müssen wissenschaftlich-technische Grundlagenuntersuchungen mit dem Ziel durchgeführt werden, Anlagen mit deutlich verkürzten Entwicklungszeiten zu realisieren.

**Forschungsbedarf** gibt es auch zu Gasturbinen im Allgemeinen. Die Fragen betreffen bislang unverstandene thermoakustische Phänomene, die Flammenstabilität nahe der mageren Verlöschgrenze, den erforderlichen Ausbrandgrad zur Reduktion des Methan-Schlupfs, die tolerable Beimengung von Wasserstoff zu Erdgas und die Umstellung auf einen Betrieb mit 100 Prozent Wasserstoff. Zudem sollten klassische Verbrennungsprozesse in der Schwerindustrie und anderen Industriesektoren auf Veränderungsmöglichkeiten untersucht werden, damit sie künftig möglichst hohe und potenziell variable Wasserstoff-Zumischungen tolerieren können.

Synthetisch hergestelltes Kerosin für die Nutzung in Flug-Gasturbinen muss bestimmte strikt definierte physikalisch-chemische Eigenschaften aufweisen. Das hat mit internationalen Bestimmungen zu tun, denen der Flugverkehr unterliegt. Die Forschungsfragen betreffen klassische Zielkonflikte zwischen Effizienz der Energieumwandlung, Flammenstabilität und Schadstoffbildung.

Bei synthetischen chemischen Energieträgern für zukünftige schadstoffarme, saubere und effiziente Verbrennungsmotoren, die unter Verwendung von erneuerbar hergestelltem Strom synthetisiert werden, handelt es sich um Wasser-

---

stoff, synthetisches Erdgas und um partiell oxygenierte Kohlenwasserstoffverbindungen. Im Vergleich zu konventionellen Diesel- und Ottokraftstoffen weisen solche Treibstoffe, darunter Methanol, Oxymethylenether (OME) und Dimethylkarbonat (DMC), zwar eine geringere Energiedichte auf. Durch ihre besonderen physikalisch-chemischen Eigenschaften haben sie aber auch vielversprechende Potenziale. Denkbar sind beispielsweise Effizienzsteigerungen durch höhere Klopfestigkeit oder die Vermeidung der sogenannten Ruß-Stickstoffoxid-Schere<sup>19</sup>.

## PERSPEKTIVEN FÜR MORGEN

Werden kohlenstofffreie chemische Energieträger eingesetzt, erübrigen sich CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus Punktquellen und CO<sub>2</sub>-Rückgewinnung aus der Erdatmosphäre. Sofern der Energieträger nicht aus atmosphäreneigenen Elementen wie zum Beispiel Wasserstoff oder Stickstoff besteht, muss jedoch das Reaktionsprodukt zurückgeführt werden.

Unter den kohlenstofffreien Energieträgern ist zuerst mit der Einführung von molekularem Wasserstoff für energietechnische und mobile Anwendungen zu rechnen. Darauf deutet unter anderem die Nationale Wasserstoffstrategie des Bundes hin [Bm20]. Forschungsbedarf ergibt sich vor allem hinsichtlich der molekulardynamischen und reaktionsspezifischen Eigenschaften von Wasserstoff. Im Einzelnen geht es dabei um Flammenstabilität, Flammendynamik, thermische Stickoxidbildung und die sicherheitsrelevanten weiten Zündgrenzen.

Neben der thermochemischen Nutzung von reinem Wasserstoff ist auch eine Mischung mit Ammoniak denkbar. Ammoniak kann ebenfalls aus erneuerbaren Energiequellen synthetisiert werden und besitzt im Vergleich zu Wasserstoff eine deutlich höhere volumetrische Energiedichte. Das erlaubt eine längerfristige Speicherung und erleichtert Transporte über lange Distanzen. **Forschungsbedarf** besteht hinsichtlich der Neigung von Ammoniak zur Stickstoffoxidbildung, seiner hohen Toxizität und bestimmter reaktionsspezifischer Eigenschaften, etwa die geringe Flammgeschwindigkeit. Potenzial hat daher vor allem der Mix mit Wasserstoff. Neue Studienergebnisse zeigen, dass sich mit Wasserstoff-Ammoniak-Mischungen künftig höhere Turbulenzgrade ohne das Risiko einer Flammenverlöschung nutzen lassen. Damit könnten sich höhere Leistungsdichten bei gleichzeitiger Verkürzung der Verweildauer im Brennraum erzielen lassen, was sich zugleich günstig auf die Entwicklung von Stickstoffoxiden auswirkt.

---

<sup>19</sup> Dabei führt die Verringerung der Rußemission zur Erhöhung der Stickoxidemission und umgekehrt.

---

## UND WAS KOMMT ÜBERMORGEN?

Noch weiter in der Zukunft liegt die thermochemische Nutzung von Metallen und Metalloxiden. In der Fachliteratur wurde kürzlich die Nutzung von elementarem Eisen als Energieträger vorgeschlagen, der in einem Reduktions-Oxidations-Zyklus die Speicherung und den Ferntransport regenerativ erzeugter Energien ermöglicht [Be18]. Die Oxidation von Eisen zur Freisetzung thermischer Energie ist vor allem in Wirbelschicht-Prozessen denkbar. Hier könnte die Nutzung bestehender Kraftwerke möglich sein – ein großer Pluspunkt für die Umsetzung neuer Technologien.

**Nur durch eine breit angelegte Forschungs- und Entwicklungstätigkeit werden wir die besten Wege für eine klimafreundliche Zukunft finden.**

Die chemische Reduktion der sich aus der thermochemischen Nutzung ergebenden Eisenoxide kann auf verschiedenen Wegen erfolgen. Eine Möglichkeit ist die Nutzung von grünem Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen, wobei Synergien mit jüngsten Vorhaben in der Stahlindustrie möglich sind. Dort will man die bisher zur Direktreduktion von Eisenerzen verwendete Kohle künftig durch Wasserstoff ersetzen [In4].

Insgesamt hat der Oxidations-Reduktions-Zyklus großes Potenzial als Energieträger im Zusammenhang mit erneuerbaren Energien. Die sich in diesem Zusammenhang ergebenden Forschungsfragen sind ausgesprochen grundlegender Natur. Sie betreffen Flammencharakteristika wie zum Beispiel das Zusammenspiel von homogenen Gasphasen- und heterogenen Oberflächenreaktionen sowie thermodynamische Eigenschaften des Gesamtprozesses und dessen Wirtschaftlichkeit. Mit Blick auf die obligatorische Rückführung des Reaktionsproduktes scheint diese Option vor allem für die stationäre Nutzung geeignet zu sein.



---

## WENIGER SCHADSTOFFE

Egal, ob kohlenstoffhaltige oder kohlenstofffreie Energieträger eingesetzt werden: Ihre thermochemische Energieumwandlung führt zur Freisetzung von Schadstoffen. Darunter sind klassische Luftschadstoffe wie Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ), Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) und Ruß sowie Feinstaub. Aber auch unverbrannte Kohlenwasserstoffe, die aus unvollständiger Umsetzung des Brennstoffs entstehen können, oder Formaldehyd als Reaktionsnebenprodukt von OME-Kraftstoffen belasten die Atmosphäre. Eine weitere Reduktion der Schadstoffbildung ist unverzichtbar, um thermochemische Anlagen auch im Rahmen künftiger gesetzlicher Emissionsgrenzwerte betreiben zu können, die Treibhausgasemissionen weiter zu senken und die gesellschaftliche Akzeptanz zu wahren.

Bei den Schadstoffreduktionstechnologien unterscheidet man zwischen Primärmaßnahmen, bei denen die Schadstoffe durch eine geeignete Prozessführung vermieden werden, und Sekundärmaßnahmen, die Schadstoffe nach der Bildung durch eine spezielle verfahrenstechnische Prozessführung verringern. Beispiele für Primärmaßnahmen sind die magere Vormischverbrennung und die Abgasrückführung. Erfolgreiche Sekundärmaßnahmen sind Katalysatoren sowie das in letzter Zeit stark diskutierte SCR-Verfahren<sup>20</sup>.



Dank Forschung und Entwicklung auf dem Weg in eine klimafreundliche Zukunft.

<sup>20</sup> SCR: Selective Catalytic Reduction (deutsch: selektive katalytische Reduktion, siehe Glossar)

---

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass für konventionelle Brennstoffe wie Erdgas, Benzin, Diesel sowie für feste Brennstoffe in der Stromerzeugung und in den Bereichen PKW- und LKW-Verkehr, im Luftverkehr sowie in zahlreichen industriellen Prozessen Primär- und Sekundärmaßnahmen existieren, die die Einhaltung von Grenzwerten ermöglichen und Potenzial für weitere Absenkungen bieten.

### **Die zentralen wissenschaftlichen Fragestellungen für die nächsten Dekaden betreffen**

- >> den Transfer von existierenden Methoden zur Schadstoffreduktion auf synthetische Brennstoffe für die Stromerzeugung, Industrieprozesse, Gebäudeanlagen und den Mobilitätssektor, insbesondere den Schiffsverkehr<sup>21</sup>,
- >> die weitere Reduktion von Schadstoffemissionen sowie
- >> die Entwicklung und Weiterentwicklung von Methoden und Verfahren, um niedrige Emissionen auch unter stark schwankenden Betriebsbedingungen zu ermöglichen.

<sup>21</sup> Ähnlich wie bei den ACARE-Zielen für den europäischen Luftverkehr [Aca] legt die International Maritime Organization (IMO) in der MARPOL-Konvention Prevention of Air Pollution from Ships Emissionsstandards fest, siehe: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx>

---

## NUMERISCHE SIMULATIONEN

Das Energiesystem soll, so der allgemeine Konsens, schnell transformiert werden. Die Entwicklung neuer Technologien aber braucht Zeit. Beschleunigen lassen sich viele Prozesse mit numerischen Simulationswerkzeugen.

Die numerische Simulation technischer Systeme unter Nutzung von Hochleistungsrechnern konnte sich in den vergangenen zwei Dekaden als eigenständige wissenschaftliche Disziplin neben Theorie und Experiment etablieren. Sie wird auch als Third Wing of Science bezeichnet. Ermöglicht wurde diese überaus positive Entwicklung durch eine stetig steigende Rechenleistung bei reduzierten Kosten. Von der Methode profitieren nahezu alle Technologiebereiche.

Auch bei Gasturbinen, Motoren, Brennstoffzellen und anderen Energieumwandlungstechnologien ermöglichen numerische Simulationsverfahren kürzere Entwicklungszeiten und eine bessere Ergebnisqualität. Die entscheidenden Ideen dafür entstehen häufig während eines Experiments. Es folgt eine Umsetzung in mathematische Modelle und anschließend in numerische Simulationen, die wiederum zu neuen Ideen führen können. Die Tragfähigkeit der Modellierungen wird dann experimentell überprüft. Auf diese Weise greifen Experiment und Theorie als zwei sich gegenseitig ergänzende wissenschaftliche Herangehensweisen optimal ineinander.

Seit einigen Jahren lassen sich mit diesem Verfahren nicht nur einzelne Komponenten, sondern gesamte Systeme abbilden und simulieren. Darüber hinaus erlauben numerische Simulationen die vollständige Digitalisierung von Prozessketten, beginnend mit den ersten Schritten der Entwicklung bis zum fertigen Produkt und weiterhin über den gesamten Lebenszyklus bis hin zur Entsorgung oder zum Recycling.

Eine weitere Entwicklung, die künstliche Intelligenz, eröffnet auch der Energietechnik hochinteressante Perspektiven. Sie dürfte zu einem besseren Verständnis grundlegender Mechanismen und zur Entwicklung optimierter Technologien beitragen.

---

**Im Interesse einer verlässlichen und machbaren Energiewende plädieren die Autoren dieses Positionspapiers für einen technologieoffenen Forschungsansatz. So lassen sich nicht nur die besten Lösungen zur Synthese chemischer Energieträger aus erneuerbaren Energien ermitteln, dieser Ansatz dürfte auch neue Wege bei der elektro- sowie thermochemischen Energieumwandlung erschließen.**

Für die thermochemische Energieumwandlung, die im Fokus dieses Positionspapiers steht, können die wichtigsten Forschungsfragen wie folgt zusammengefasst werden:

- >> Wie können wir thermochemische Energieumwandlungssysteme so mit synthetischen chemischen Energieträgern betreiben, dass sie nicht nur nachhaltig, sondern auch zuverlässig und kosteneffizient sind?
- >> Wie können wir thermochemische Energieumwandlungssysteme und synthetische chemische Energieträger optimal aufeinander abstimmen?
- >> Wie können die Fluktuationen von Strom aus erneuerbaren Quellen mit thermochemischen Energieumwandlungssystemen sicher, sauber, nachhaltig und kosteneffizient ausgeglichen werden?
- >> Wie können wir relevante physikalisch-chemische Prozesse akkurat in mathematischen Modellen abbilden und zuverlässig mit numerischen Simulationen vorhersagen?
- >> Wie können wir die Kopplung von chemischen Reaktionen und physikalischen Transportprozessen präzise und akkurat messen, ohne den Prozess zu stören?
- >> Wie können wir die Methoden der künstlichen Intelligenz nutzen, um thermochemische Energieumwandlungsprozesse prädiktiv zu simulieren, physikalisch-chemische Wirkmechanismen zu analysieren und neue, exakt regelbare thermische Energiekonverter zu entwickeln?

---

## **FAZIT**

Was dieses Kapitel vor Augen führt, ist ein Anliegen des gesamten Positionspapiers: Es gibt heute schon viele Optionen für die Energiewende und am Horizont zeichnen sich weitere spannende Innovationen ab. Wir sollten sie offen erkunden, erproben und nutzen, wenn sie uns dem großen Ziel näherbringen: einer klimafreundlichen Zukunft.

---

# Anhang

## LITERATUR

- [Ac15]** acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina e.V., Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. (Hrsg.) (2015). Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Berlin.
- [Ac17]** acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina e.V., Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. (Hrsg.) (2017). Sektorkopplung. Optionen für die nächste Phase der Energiewende. Berlin.
- [Ac18]** acatech (Hrsg.). (2018). CCU und CCS - Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie (acatech POSITION). München: Herbert Utz Verlag
- [Ac19]** acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina e.V., Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. (Hrsg.). (2019). Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Strategien für eine nachhaltige Bioenergienutzung. Berlin.
- [Ac20]** Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina e.V., acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. (Hrsg.) (2020), Energiewende 2030: Europas Weg zur Klimaneutralität. Berlin.
- [Aca]** <https://www.acare4europe.org/sria/flightpath-2050-goals>
- [Be18]** J. M. Bergthorson, Recyclable metal fuels for clean and compact zero-carbon power, Prog. Energy Combust. Sci. 68 (2018) 169-196.
- [BM20]** Nationale Wasserstoffstrategie: <https://www.bmbf.de/de/nationale-wasserstoff-strategie-9916.html>
- [De18]** T. Bründlinger et al. (2018). Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.). dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Berlin.
- [De19]** Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina e.V., acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V., Bundesverband der Deutschen Industrie e.V., Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.). (2019). Expertise bündeln, Politik gestalten. Energiewende jetzt! Berlin.
- [Dv]** Abschlussbericht DVGW; Förderkennzeichen G 1-07-10
- [EGD]** [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)
- [En]** ENTSO-E <https://transparency.entsoe.eu/dashboard/show>
- [Ent]** [https://www.energy-charts.de/power\\_de.htm](https://www.energy-charts.de/power_de.htm)
- [Fh19]** Fraunhofer ISE, Energy Charts, [https://www.energy-charts.de/energy\\_pie\\_de.htm?year=2019](https://www.energy-charts.de/energy_pie_de.htm?year=2019)
- [Ge17]** HA technology now available at industry-first 64 percent efficiency. GE Power. 04.12. 2017.

- 
- [Ge18] P. Gerbert et al. (2018). BCG The Boston Consulting Group, prognos (Hrsg.). Klimapfade für Deutschland.
- [Gc] <http://www.engineeringchallenges.org/challenges.aspx>
- [In4] IN4climate.NRW: Wasserstoff statt Kohlenstoff by thyssenkrupp Steel: <https://www.in4climate.nrw/best-practice/projekte/2019/wasserstoff-statt-kohlenstoff-by-thyssenkrupp-steel/>
- [IP15] <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [Ke18] D. W. Keith, G. Holmes, D. St. Angelo, K. Heidel. 6/7/2018. A Process for Capturing CO2 from the Atmosphere. Joule. Publisher's Version
- [Ko10] J. Kopyscinski, T.J. Schildhauer, S.M. Biollaz. Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass – A technology review from 1950 to 2009. In: Fuel 89 (2010) 1763–1783.
- [La18] R. S. Laursen. Ship operation using LPG and ammonia as fuel on MAN B&W Dual Fuel ME-LGIP Engines. 15th Annual NH3 Fuel Conference, Pittsburgh, PA, October 31, 2018, NH<sub>3</sub> Energy + Topical Conference at the AIChE Annual Meeting
- [Sc16] S. Schwietzke et al. Upward revision of global fossil fuel methane emissions based on isotope database, Nature 538 (2016) 88–91.
- [SDG] UN Sustainable Development Goals: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>
- [SI] <https://new.siemens.com/global/de/produkte/mobilitaet/strassenverkehr/elektromobilitaet/ehighway.html>
- [St14] Sterner, Stadler, Energiespeicher-Bedarf, Technologien, Integration, Springer-Vieweg 2014
- [Tr20] Persönliche Kommunikation, Leiter der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut, KIT, Herr Prof. Dr.-Ing. D. Trimis
- [Ub19] Klimaschutz in Zahlen, Fakten, Trends und Impulse, Ausgabe 2019, [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz\\_zahlen\\_2019\\_broschuere\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2019_broschuere_bf.pdf)
- [WD07] CO<sub>2</sub>-Bilanzen verschiedener Energieträger im Vergleich, Zur Klimafreundlichkeit von fossilen Energien, Kernenergie und erneuerbaren Energien, Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages, WD 8 - 056/2007
- [Yi16] C. Yin, J. Yan. Oxy-fuel combustion of pulverized fuels: Combustion fundamentals and modeling, Applied Energy 162 (2016) 742–762.

---

# Anhang

## GLOSSAR

**Blauer Wasserstoff:** Wasserstoff, der aus Erdgas gewonnen wird. Dabei entstehendes CO<sub>2</sub> wird abgeschieden und anschließend gespeichert oder genutzt.

**Brennstoffzelle:** eine galvanische Zelle, die die chemische Energie eines kontinuierlich zugeführten chemischen Energieträgers in elektrische Energie umwandelt. Wird Wasserstoff als chemischer Energieträger verwendet, bildet sich als Reaktionsprodukt Wasser. Wird Methan als chemischer Energieträger verwendet, bilden sich Wasser und CO<sub>2</sub> als Reaktionsprodukte.

**Carnot-Batterie:** Grundlage ist das Power-to-Heat-Prinzip. Dabei wird überschüssiger Strom für den Betrieb einer Hochtemperaturwärmepumpe verwendet, die Wasser oder Flüssigsalz erhitzt. Die so gespeicherte thermische Energie kann bei Bedarf in einem Dampfkraftprozess in elektrischen Strom umgewandelt werden. Der Wirkungsgrad liegt, je nach technischer Auslegung, zwischen 35 und 70 Prozent.

**CCS (Carbon Capture and Storage):** energieverfahrenstechnische Methode, um CO<sub>2</sub> aus dem Abgasstrom eines thermischen Kraftwerks abzutrennen. Nach der Abtrennung wird das CO<sub>2</sub> verflüssigt und gespeichert. Eine Speicherung ist in ausgebeuteten Gas- oder Erdöllagerstätten, in salinen Aquiferen (tiefliegende, salzwasserführende Gesteinsschichten, siehe auch [https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/rest/items/item\\_8359\\_3/component/file\\_10158/content](https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/rest/items/item_8359_3/component/file_10158/content)) oder im Meeresuntergrund möglich. Als problematisch wird unter anderem der zusätzliche Energieaufwand für Abscheidung, Transport und Speicherung gesehen. Einen effektiven Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels kann die Speicherung von CO<sub>2</sub> nur leisten, wenn das eingelagerte Treibhausgas dauerhaft und vollständig in den Speichern verbleibt.

**CCU (Carbon Capture and Utilization):** eine energieverfahrenstechnische Methode wie CCS mit dem Unterschied, dass das abgetrennte CO<sub>2</sub> weiterverwendet wird. Verwendungsmöglichkeiten ergeben sich in der chemischen Industrie und insbesondere auch bei der Synthese kohlenstoffhaltiger Brennstoffe.

**Chemical-Looping-Verfahren:** mehrstufiges, energieverfahrenstechnisches Verfahren. Dabei wird das CO<sub>2</sub> aus dem Abgas eines thermischen Kraftwerks in einem Reaktor abgetrennt und zum Beispiel in natürlich vorkommendem Kalkstein gebunden. In einem zweiten Reaktor wird das reine Kohlenstoffdioxid wieder freigesetzt und für die Speicherung aufbereitet. Der Vorteil des Verfahrens ist, dass auch bestehende Kraftwerke nachgerüstet werden können. Es ist eine energetisch günstige Variante zur Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus einem Abgasstrom.

**Chemischer Energieträger:** Ein chemischer Energieträger speichert chemische Energie in chemischen Verbindungen. Chemische Energie kann über chemische Reaktionen zum Beispiel als Wärme freigesetzt werden.



---

**Demand Control:** aktives Management der Verbräuche (Lasten) im Stromnetz mit dem Ziel der Stabilisierung. Bei Engpässen werden verbrauchende Geräte abgeschaltet und bei ausreichender Kapazität wieder zugeschaltet.

**Disruptiver Technologiewechsel:** schneller Wechsel von einer bestehenden auf eine neue Technologie. Ein Beispiel wäre der gleichzeitige Wechsel von Energieträger und Energiekonverter.

**Drop-in-Technologie:** In diesem Kontext steht der Begriff für die Verwendung (drop in) synthetischer chemischer Energieträger aus erneuerbaren Energien in bestehenden thermochemischen Energiekonvertern.

**Druckluftspeicher:** Speicherung von Energie in mechanischer Form durch die Kompression von Luft.

**Elektrochemische Energieumwandlung:** Bei der elektrochemischen Energieumwandlung wird chemische Energie mithilfe einer galvanischen Zelle direkt in elektrische Energie umgewandelt. Die Prozesse der Oxidation, also der Elektronenabgabe, und der Reduktion (Elektronenaufnahme) erfolgen räumlich getrennt.

**Energiekonverter:** technisches System, das Energie von der einen in die andere Energieform überführt. Beispiele sind Solarmodule in der Photovoltaik, die Lichtenergie in Strom umwandeln, oder Gasturbinen, die chemische Energie zunächst in Wärme und nachfolgend in mechanische Energie umwandeln. Die mechanische Energie kann dann zum Betrieb eines Stromgenerators oder als Antrieb in der Luftfahrt genutzt werden.

**Erneuerbare Energien:** technisch nutzbare Energieformen, die zum Beispiel durch Umwandlung von Wind- und Sonnenenergie gewonnen werden. Den größten Beitrag leisten hierzulande Photovoltaik- und Windkraftanlagen, die Sonnen- bzw. Windenergie in Strom umwandeln.

**Flussbatterie:** energietechnisches System zur Speicherung elektrischer Energie in chemischen Verbindungen. Die Reaktionspartner werden in einem Lösungsmittel gelöst. Zwei energiespeichernde Elektrolyte zirkulieren in zwei getrennten Kreisläufen, zwischen denen in einer galvanischen Zelle die Energieumwandlung von chemischer in elektrische Energie erfolgt.

**Gasmotor:** Verbrennungskraftmaschine, die mit einem gasförmigen Brennstoff, beispielsweise mit synthetischem Erdgas, betrieben wird. Dabei wird chemische Energie in mechanische Energie umgewandelt, um etwa einen Stromgenerator anzutreiben.

**Gasturbinenkraftwerk:** Kraftwerk zur Erzeugung von Strom auf Basis der Gasturbinentechnologie.

---

**Gas- und Dampfkombi-Kraftwerke (GuD):** Kraftwerk zur Stromerzeugung, in dem die Abwärme eines Gasturbinenkraftwerks zusätzlich genutzt wird.

**Gigawattstunden:** Einheit für eine physikalische Energie, die durch Multiplikation von Leistung und Zeit berechnet wird. Das Präfix Giga steht für Milliarden ( $10^9$ ).

**Grüner Wasserstoff:** aus erneuerbaren Energien hergestellter Wasserstoff, der keinerlei  $\text{CO}_2$ -Emissionen verursacht.

**Hochtemperatur-Oxidationsprozesse:** siehe thermochemische Energieumwandlung.

**Installierte Leistung:** im Kontext dieses Positionspapiers ist die in Deutschland maximal verfügbare Kraftwerksleistung gemeint.

**Kalte Dunkelflaute:** länger anhaltende Periode, in der gleichzeitig niedrige Temperaturen vorherrschen, wenig solare Energie eingestrahlt wird und kaum Wind weht.

**Magere Verlöschgrenze:** Der Begriff bezeichnet das Verhältnis von Luft zu Brennstoff, bei dem thermochemische Oxidationsprozesse infolge von Luftüberschuss und der Einwirkung hoher Turbulenzen zum Erliegen kommen.

**Methan-Schlupf:** Anteil des bei Produktion, Transport und Nutzung in die Atmosphäre emittierten Methans.

**Numerische Simulation:** rechnergestützte Simulation von Prozessen oder Phänomenen unter Nutzung von Methoden der numerischen Mathematik. In dem Kontext des Positionspapiers sind insbesondere Simulationen von chemisch reagierenden turbulenten Mehrphasenströmungen wichtig (englisch: Computational Fluid Dynamics, CFD). Damit können beispielsweise die Einspritzung von flüssigen Kohlenwasserstoffen in die Brennkammer einer Gasturbine und nachfolgende Prozesse simuliert werden. Eine solche Simulation beschreibt die Bildung von Tropfen, deren Verdampfung und Mischung mit der umgebenden Luft, der Zündung des Gemischs, der thermochemischen Umsetzung bis hin zur Wärmefreisetzung und Schadstoffbildung.

**Partiell oxygenierte Kohlenwasserstoffverbindungen:** Kohlenwasserstoffverbindungen, die auch Sauerstoffatome enthalten.

**Photovoltaik:** energieverfahrenstechnische Methode, die Lichtenergie in elektrische Energie umwandelt.

**Power-to-Liquid:** energieverfahrenstechnische Methode, die elektrische Energie unter Verwendung von erneuerbaren Quellen in flüssige chemische Energieträger umwandelt.

**Pre-Combustion Capture:** energieverfahrenstechnische Methode, die den Kohlenstoff aus kohlenstoffhaltigen chemischen Energieträgern vor der thermochemischen Umwandlung entfernt.

**Prozesswirkungsgrad:** der bei Energieumwandlung erreichte prozentuale Anteil technisch nutzbarer Energie im Vergleich zur insgesamt eingesetzten Energie.

---

**Post-Combustion Capture:** energieverfahrenstechnische Methode, bei der in thermochemischen Umwandlungsprozessen entstandenes CO<sub>2</sub> aus dem Abgas abgetrennt wird. Ein Beispiel ist das Chemical-Looping-Verfahren.

**Pumpspeicherwerke:** Diese Anlagen speichern überschüssige, erneuerbar hergestellte elektrische Energie in Lageenergie (potenzielle Energie). Mit dem Strom wird Wasser bergauf gepumpt. Bei hoher Stromnachfrage fließt das Wasser bergab und Generatoren wandeln die Lageenergie wieder in Strom um.

**Reduktions-Oxidations-Zyklus:** In diesem Kontext ist ein Zyklus gemeint, bei dem Strom aus erneuerbarer Energie in einem Energieträger chemisch zwischengespeichert wird (Reduktionsschritt) und über elektro- oder thermochemische Energieumwandlung durch Oxidationsprozesse ausgespeichert wird (Oxidationsschritt). Das oxidierte chemische Reaktionsprodukt wird gesammelt und in einem Kreislauf wieder der Reduktion zugeführt. Als chemischer Energieträger kommen Metalle in Frage, etwa Eisen. Die Energieeinspeicherung (Reduktion) kann in Regionen mit günstigen Bedingungen für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen erfolgen, die Ausspeicherung (Oxidation) nach Transport der Energieträger in weit entfernten Regionen. Im Unterschied zu Wasserstoff verfügen Metalle über eine höhere volumetrische, aber geringere gravimetrische Energiedichte. Sie lassen sich verlustfrei lagern und belasten die oft knappen Wasservorräte in sonnenreichen Regionen nicht. Um das große Potenzial von Reduktions-Oxidations-Zyklen zu erschließen, ist intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit erforderlich.

**Regelbare Kraftwerke:** In einem Stromnetz muss so viel elektrische Leistung verfügbar sein, wie gebraucht wird. Um Schwankungen von Angebot und Nachfrage auszugleichen, ist eine Steuerung notwendig, etwa durch schnell regelbare Kraftwerke. Für diese Aufgabe eignen sich manche Wärmekraftwerke, aber auch Wasserkraftwerke wie zum Beispiel Pumpspeicherwerke. Sie stabilisieren das Stromnetz.

**Ruß-Stickstoffoxid-Schere:** Die Verringerung der Rußemission führt zur Erhöhung der Stickstoffoxidemission und umgekehrt.

**SCR-Verfahren:** Das Akronym SCR steht für Selective Catalytic Reduction (deutsch: selektive katalytische Reduktion). In dieser Stellungnahme ist das Einbringen einer sorgfältig dosierten Harnstoff-Wasser-Lösung in das Abgas einer thermochemischen Energieumwandlung gemeint. Dabei entsteht Ammoniak, das die anfallenden Stickstoffoxide in einem Katalysator in harmlosen Stickstoff und Wasserdampf umwandelt.

**Synthetische Kohlenwasserstoffe:** künstlich hergestellte Kohlenwasserstoffe oder partiell oxygenierte Kohlenwasserstoffe. Ausgangsstoffe sind in diesem Kontext elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen, Wasser und Kohlenstoffdioxid.

**Synthetische Brennstoffe:** künstlich hergestellte chemische Energieträger. Diese können gasförmig sein (zum Beispiel Wasserstoff), flüssig (zum Beispiel Methanol) oder fest (zum Beispiel Eisenpulver).

**Terawatt:** Watt ist die Einheit für eine physikalische Leistung. Das Präfix Tera steht für Billionen (10<sup>12</sup>).

---

**Terawattstunden:** Einheit für eine physikalische Energie, die durch Multiplikation von Leistung und Zeit berechnet wird. Das Präfix Tera steht für Billionen ( $10^{12}$ ).

**Thermoakustische Phänomene:** Bei einer thermochemischen Energieumwandlung kann es zu einer sich verstärkenden Rückkopplung zwischen Wärmefreisetzung und Brennstoffzufuhr in den Reaktionsraum kommen. Es bauen sich Druckschwingungen auf. Werden diese nicht gedämpft oder unterdrückt, ist eine Zerstörung des Energiekonverters möglich.

**Thermochemische Energieumwandlung:** exotherme Oxidationsreaktionen (Verbrennung) mit Freisetzung der chemisch gebundenen Energie, die in Form von Wärme oder Arbeit nutzbar ist. Die Energieumwandlung erfolgt durch chemische Reaktionen zwischen einem chemischen Energieträger (Brennstoff) und einem Oxidationsmittel (häufig Luft) bei hohen Prozesstemperaturen und häufig hohen Prozessdrücken.

**Wirbelschicht-Prozesse:** verfahrenstechnische Methode, bei der eine Schüttung von Feststoffpartikeln durch die aufwärtsgerichtete Strömung eines Fluids in ein Fluid-Feststoff-Gemisch überführt wird und Fluid-ähnliche Eigenschaften erhält.

-----

-----

---

## IMPRESSUM

### **AUTOREN**

Andreas Dreizler, Heinz Pitsch,  
Christof Schulz, Johannes Janicka

### **REDAKTION**

Lilo Berg Media

### **GESTALTUNG**

Annette Klusmann. puredesign.

### **BILDHINWEISE**

Titel: Adobe Stock\_rybindmitriy

Seite 10: Adobe Stock

Seite 14: Alamy Stock Foto\_

David R. Frazier Photolibrary, Inc

Seite 16: Adobe Stock\_kalafoto

Seite 20: Adobe Stock\_Alexander

Seite 29: Daimler

Seite 30: Adobe Stock\_naka

Seite 32: Adobe Stock\_buhanovskiy

Seite 35: Adobe Stock\_ArTo

Seite 36: Adobe Stock\_Thomas

Seite 41: Adobe Stock\_enanuchit





Stand: Juli 2020