



Das Trianel Kohlekraftwerk Lünen.

«Grünes» Eisen statt Kohle verbrennen

Umrüstung von Kohlekraftwerken | Die Transformation des Energiesystems mit Ausstieg aus der Kohleverstromung wirft Fragen nach der zukünftigen Nutzung der bestehenden Infrastruktur und der Sicherung einer verlässlichen Energieversorgung auf. Ein innovativer Ansatz besteht darin, statt Kohle Eisen als CO₂-freien Energieträger in bestehenden Kraftwerken zu verbrennen.

JANNIK NEUMANN ET AL.

Der Klimawandel und die damit verbundene Notwendigkeit einer drastischen Reduktion von Treibhausgasemissionen erfordern einen fundamentalen Umbau unserer Energiesysteme. Trotz der globalen Bestrebungen ist die installierte Kapazität von Kohlekraftwerken seit dem Übereinkommen von Paris um 13 % auf 2,18 TW gestiegen, weitere 0,6 TW befinden sich aktuell im Bau oder in Planung (Bild 1a). Kohle ist damit weiterhin die wichtigste Einzelquelle für die globale Stromproduktion, mit einem Anteil von 34 % [1].

Die Energiewende erfordert jedoch einen konsequenten Ausstieg aus fossilen Brennstoffen. Diese Entwicklung stellt uns vor zwei wesentliche Herausforderungen: Erstens stellt sich die Frage nach dem Umgang mit der bestehenden, kapitalintensiven Infrastruktur der Kohlekraftwerke. Etwa zwei Drittel der globalen Kohlekraftwerkskapazität sind weniger als 20 Jahre alt (Bild 1b). Um die Klimaziele des Übereinkommens von Paris zu erreichen, müssten viele dieser Kraftwerke deutlich früher als ursprünglich geplant vom Netz gehen. Konkret ist hierfür eine durch-

schnittliche Stilllegung nach 35 Jahren (2°C-Ziel) bzw. 20 Jahren (1,5°C-Ziel) notwendig [2], was deutlich unter der technisch üblichen Betriebsdauer von 50 Jahren liegt. Dies würde zu einem erheblichen Verlust an Vermögenswerten führen und bei betroffenen Stakeholdern für Widerstand sorgen.

Zweitens erfordert der Umstieg auf ein Energiesystem, das stark auf volatile erneuerbare Quellen wie Sonne und Wind setzt, innovative Lösungen für grosse Energiespeicher sowie grundlastfähige Backup-Systeme, um die Versorgungssicherheit stets zu gewährleisten.

Eine vielversprechende Lösungsoption für diese Herausforderungen ist die Nutzung reaktiver Metalle statt Kohle. Insbesondere «grünes» Eisen, das mithilfe erneuerbarer Energien gewonnen wird, rückt zunehmend als kohlenstofffreier und rezyklierbarer Energieträger in den Fokus [3]. Die Idee besteht darin, dieses Eisen in Pulverform in modifizierten Kohlekraftwerken zu verbrennen und so CO₂-frei Strom zu erzeugen.

Ein Eisen-Energie-Kreislauf

Das Konzept der reaktiven Metalle als erneuerbare Energieträger gewinnt seit etwa einem Jahrzehnt an Bedeutung. Es basiert auf der Idee, erneuerbare Energie chemisch zu speichern, indem Metalloxide zu Metallen reduziert werden. Elemente wie Eisen oder Aluminium können so Energie in kompakter Form chemisch speichern und bei Bedarf durch eine Oxidationsreaktion wieder freisetzen [4]. Durch die verlustfreie Zyklierbarkeit des metallischen Energieträgers entsteht ein Material- und Energiekreislauf. Als Energieträger bieten reaktive Metalle diverse Vorteile: Ihre hohe volumetrische Energiedichte übertrifft die von Batterien oder komprimiertem/verflüssigtem Wasserstoff um eine Größenordnung, was sie für Lagerung und Transport grosser Energiemengen attraktiv macht. Sie sind über lange Zeiträume sicher lagerfähig und vergleichsweise einfach zu transportie-

ren. Ein entscheidender Vorteil ist, dass bei ihrer Verbrennung (Hochtemperaturoxidation) keine CO₂-Emissionen entstehen.

In der Gruppe der reaktiven Metalle ist Eisen ein besonders vielversprechender Kandidat [5]: Es ist das viert häufigste Element der Erdkruste, weltweit reichlich verfügbar, für Mensch und Umwelt unbedenklich und vergleichsweise kostengünstig in der Gewinnung. Ein weiterer Vorteil von Eisen zeigt sich bei der Verbrennung mit Luftsauerstoff, da die Reaktion überwiegend heterogen abläuft, also in der Fest- oder Flüssigphase [6]. Das Reaktionsprodukt ist ein festes Eisenoxidpulver, das einfach gesammelt und recycelt werden kann.

Der Schlüssel zur ökologischen Nachhaltigkeit dieses Konzepts ist das sogenannte «grüne» Eisen. Dieser Energieeinspeicherungsprozess muss CO₂-neutral erfolgen. Der technologisch am weitesten entwickelte Ansatz hierfür ist die Direktreduktion von Eisenoxid (aus primärem Eisenerz oder als recyceltes Verbrennungsprodukt) mit grünem Wasserstoff. Letzterer wird durch Elektrolyse von Wasser unter Einsatz erneuerbarer Energien gewonnen. In der metallurgischen Industrie gibt es bereits grosse Bestrebungen, die konventionelle Eisenherstellung zu dekarbonisieren. Dies hätte erhebliche synergetische Effekte für die Nutzung von Eisen als Energieträger.

Der resultierende Eisen-Energie-Kreislauf (**Bild 2**) ist ein zyklischer Prozess, der die Speicherung und bedarfsgerechte Freisetzung von Energie ermöglicht:

- **Einspeichern (Reduktion):** Eisenoxide (FeO_x) werden durch grünen Wasserstoff (H₂) und zugeführte erneuerbare Hilfsenergie zu metallischem Eisen (Fe) reduziert.
- **Ausspeichern (Oxidation):** Zur Energiefreisetzung wird das Eisenpulver in einem modifizierten Kraftwerk mit Luftsauerstoff (O₂) bei hohen Temperaturen verbrannt. Diese exotherme Reaktion setzt Wärme frei, die zur Dampferzeugung und anschliessend zur Stromproduktion genutzt wird. Alternativ kann das Eisen auch mit Wasserdampf reagieren, um bedarfsgerecht Wasserstoff zu produzieren, was jedoch hier nicht näher vorgestellt wird.
- **Transport und Lagerung:** Metallisches Eisen und Eisenoxid sind sicher lager- und transportierbar. Der Kreislauf lässt sich dadurch flexibel gestalten: Die energieintensive Reduktion kann an Standorten mit kostengünstiger erneuerbarer Energie erfolgen, die Energiefreisetzung bedarfsgerecht an anderen Orten. Auch ein rein lokaler Kreislauf ist möglich. Das Eisenoxid wird stets recycelt, was für einen geschlossenen Eisen-Energie-Kreislauf sorgt.

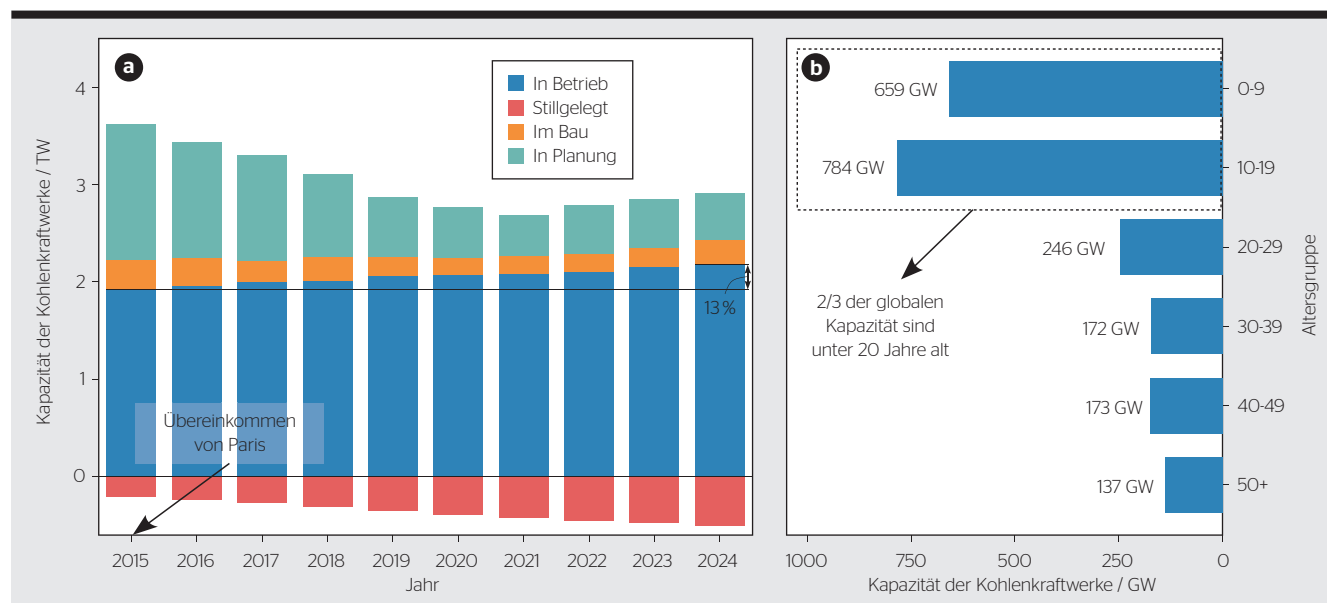


Bild 1 Globale Kohlekraftwerkskapazität **a)** nach Betriebsstatus und **b)** nach Altersstruktur der bestehenden Kohlekraftwerke in 2024. Die Daten stammen aus [7].

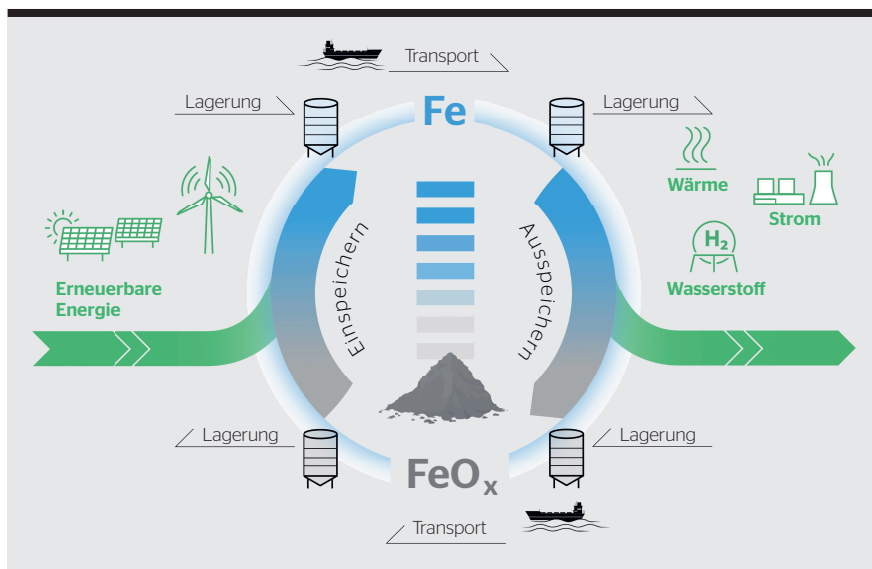


Bild 2 Eisen-Energie-Kreislauf für die Einspeicherung, den Transport, die Lagerung und die Ausspeicherung erneuerbarer Energie.

Doch welche technischen Anpassungen sind für eine Verbrennung von Eisen in bestehenden Kohlekraftwerken erforderlich?

Technische Aspekte der Umrüstung

Bei der Umrüstung eines Kohlekraftwerks auf Eisen bleibt das Grundprinzip erhalten: Die Verbrennung von Eisenpulver liefert Hochtemperaturwärme, verdampft Wasser und treibt eine Dampfturbine an, deren Drehmoment anschliessend im Generator Strom erzeugt. Ein wesentlicher Vorteil der Umrüstung auf Eisen ist, dass grosse Teile der bestehenden Kraftwerksinfrastruktur weiter genutzt werden können (**Bild 3**). Dazu zählen die Dampfturbinen, der Generator, die Netzanbindung (Transformatoren, Schaltanlagen) und die Kühlsysteme. Sogar der Dampferzeuger (Kessel) und wesentliche Teile der Gebäudeinfrastruktur und Hilfssysteme können weiter genutzt werden.

Neben diesen Synergien sind gewisse technische Modifikationen und Neuentwicklungen bei der Brennstofflagerung und -förderung, der Brennertechnologie, dem Dampfkessel und der Rauchgasreinigung für einen effizienten und sicheren Betrieb mit Eisen nötig [9].

Bei der Lagerung und Förderung von Eisenpulver muss berücksichtigt werden, dass es sich in seinen Lagereigenschaften von Kohle unterscheidet. Es

hat eine höhere Dichte, muss trocken gelagert werden und kann als Staub unter bestimmten Bedingungen explosionsfähig sein – für den sicheren Umgang mit reduziertem Eisen bestehen bereits Vorschriften und technische Lösungen. Die Kohlemühlen des Kraftwerks werden hingegen nicht mehr benötigt, da das Eisen idealerweise in der passenden Partikelgrösse angeliefert wird. Existierende Silos und Fördersysteme müssen voraussichtlich angepasst werden.

Beim Brenner muss beachtet werden, dass aufgrund des geringeren massenbezogenen Heizwertes von Eisen im Vergleich zu Steinkohle der Brennstoffmassenstrom für die gleiche thermische Leistung bis zu viermal grösser ist, bei leicht geringerem spezifischem Luftbedarf. Die Entwicklung und Optimierung von Brennern, die diese Bedingungen berücksichtigen und eine stabile, effiziente sowie vollständige Verbrennung des Eisenpulvers gewährleisten, ist ein zentrales Thema für Forschung und Entwicklung.

Die Verbrennung von Eisen führt zu einer veränderten Wärmeübertragungscharakteristik im Dampfkessel. Gleichzeitig ist die Beladung des Rauchgases mit festem Eisenoxid deutlich höher (bis zu 45 Gew.-% im Vergleich zu ca. 1 Gew.-% Asche bei Kohle). Dies erfordert möglicherweise Anpassungen der Heizflächen und der Werkstoffe, um abrasiven Partikeln

und potenziellen Ablagerungen standzuhalten. Das genaue Ausmass dieser Herausforderungen wird ebenfalls erforscht.

Da Eisen keinen Kohlenstoff, Schwefel oder gebundenen Stickstoff enthält, entfallen direkte CO₂- und SO_x-Emissionen sowie brennstoffbedingte NO_x-Emissionen. Der hohe Anteil an Eisenoxidpulver im Rauchgas muss jedoch abgeschieden werden (z.B. durch Zyklone, Gewebefilter, E-Filter). Experimente weisen auf eine extrem geringe thermische NO_x-Bildung hin.

Modellbasierte Studien [9,10] zeigen, dass die Umrüstung von Kohle- auf Eisenkraftwerke technisch umsetzbar ist und zu einer Steigerung des Netto-Kraftwerkswirkungsgrades um ein bis zwei Prozentpunkte führen kann. Die Gründe hierfür liegen in einer verbesserten Wärmeübertragung durch das partikelbeladene Rauchgas und einem geringeren Eigenenergiebedarf des Kraftwerks, da Komponenten wie Kohlemühlen, Rauchgasentschwefelung und sehr wahrscheinlich die Rauchgasentstickung entfallen. Da kein Schwefel im Brennstoff enthalten ist, entfällt zudem die Limitierung der Rauchgasabkühlung durch den Schwefelsäuretaupunkt, was potenziell niedrigere Rauchgasaustrittstemperaturen und somit eine bessere Wärmeausnutzung ermöglicht. Ersten Schätzungen zufolge könnten die Kosten für eine solche Umrüstung im Bereich von etwa 15% der Investitionskosten für einen Kraftwerksneubau liegen.

Chancen

Die Umrüstung von Kohlekraftwerken für die Verbrennung von grünem Eisen eröffnet Chancen für die zukünftige Energieversorgung. Da Eisenkraftwerke CO₂-freie, regelbare Leistung bereitstellen, können sie fluktuierende erneuerbare Energien ergänzen und so einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung der Stromversorgung leisten. Auch im Wärmesektor (z.B. bei industrieller Prozesswärme) gibt es Potenzial für eisenbasierte saisonale Backup-Systeme. Ein weiterer Vorteil liegt in der Nutzung vorhandener Kraftwerks-, Netz- und Transportinfrastruktur, denn dadurch wird der Investitionsbedarf und die Umsetzungszeit reduziert.

Im Vergleich zu grünem Wasserstoff ist Eisen insbesondere beim Langstre-

ckentransport und der Langzeitspeicherung vorteilhaft. Während Wasserstoff aufwendig verflüssigt werden muss, lässt sich Eisen als Feststoff einfach und kostengünstig handhaben, transportieren und lagern. Technisch-wirtschaftliche Betrachtungen [11,12] deuten darauf hin, dass die vorteilhaften Transport- und Speichereigenschaften in Kombination mit dem Umrüstungspotenzial von Kohlekraftwerken, die im Vergleich zur Wasserstoffproduktion höheren Kosten für die Eisenoxidreduktion überkompensieren.

Ein wichtiger Faktor für die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit ist der Gesamtwirkungsgrad des Kreislaufs (Strom-zu-Strom-Effizienz). Aktuelle Schätzungen hierfür liegen, je nach Technologie und Randbedingungen, zwischen 21 % und 32 % [10]. Diese liegen in der gleichen Größenordnung wie bei Wasserstoff oder Ammoniak als grüne Energieträger (20 bis 30 % [13]). Optimierungspotenzial besteht bei den Reduktionskonzepten und der Wirkungsgradsteigerung von Gross-Elektrolyseuren.

Wettbewerbsfähigkeit

Die Wettbewerbsfähigkeit von grünem Eisen gegenüber fossilen Energieträgern hängt von mehreren Faktoren ab, insbesondere von niedrigen Gesteungskosten für erneuerbare Energie. Erste Analysen [11] zeigen, dass grünes Eisen bei Strompreisen zwischen 0,01 und 0,03 USD/kWh und einer modera-

ten CO₂-Bepreisung (rund 100 USD/t CO₂) bereits konkurrenzfähig mit fossilen Energieträgern sein könnte. Eine deutlich höhere CO₂-Steuer (z.B. über 250 USD/t) würde die Wettbewerbsposition weiter verbessern und auch bei Strompreisen von rund 0,05 USD/kWh Parität ermöglichen. Da dies den Stromgestehungskosten erneuerbarer Energie in Deutschland entspricht [14], wäre der Eisenkreislauf auch mit lokaler Einspeicherung kompetitiv. Im Vergleich zur heutigen fossilen Erzeugung sind die höheren Kosten zudem tragbar, wenn Eisen als ergänzender saisonaler Speicher die Versorgungssicherheit in einem erneuerbaren Energiesystem stärkt. Um das Potenzial zu nutzen, sind technologische Fortschritte und Skaleneffekte in der gesamten Wertschöpfungskette nötig.

Herausforderungen

Diesen vielversprechenden Potenzialen stehen jedoch weitere Herausforderungen und ein beträchtlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf gegenüber. Die Skalierung der Technologie von Pilotanlagen auf den industriellen Grossmassstab ist eine weitere Hürde und betrifft sowohl die Produktionskapazitäten für grünes Eisen als auch die Umrüstung bestehender Kraftwerke. Materialwissenschaftliche Aspekte (z.B. Zyklenstabilität) und die Kesselintegrität erfordern weitere Forschung, um die Langzeitbeständigkeit der Werkstoffe unter den spezifischen Bedingungen der Eisenverbren-

nung (hohe Temperaturen, abrasive Partikel, Ablagerungen) zu gewährleisten. Die Entwicklung neuer Reduktionskonzepte und die Optimierung der Verbrennungstechnik hinsichtlich vollständigen Ausbrands, Temperaturkontrolle und Vermeidung von Nanopartikel-Emissionen sind ebenso zentrale Forschungsfelder. Es bedarf zudem klarer regulatorischer Rahmenbedingungen und Massnahmen zur Förderung der Akzeptanz in der Öffentlichkeit, um die Technologie erfolgreich zu etablieren.

Fazit und Ausblick

Die Umrüstung von Kohlekraftwerken für die Nutzung mit grünem Eisen als CO₂-freiem Energieträger ist ein vielversprechender Ansatz für die Dekarbonisierung des Strom- und Wärmesektors. Eine hier nur kurz angeschnittene Variante des Kreislaufes eignet sich zusätzlich für die dezentrale und bedarfsgerechte Wasserstoffproduktion. Aktuell befinden sich auf metallischen Energieträgern basierende Technologien noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium (Technologie-reifegrad 5–6), jedoch mit bereits deutlich sichtbaren Fortschritten. International arbeiten Forschungsinitiativen, Pilotprojekte und Start-ups an metallischen Energieträgern. So forschen z. B. in der Schweiz die ETH Zürich und die Ostschweizer Fachhochschule, in den Niederlanden die TU Eindhoven, in Kanada die McGill University sowie in Deutschland die TU Darmstadt und

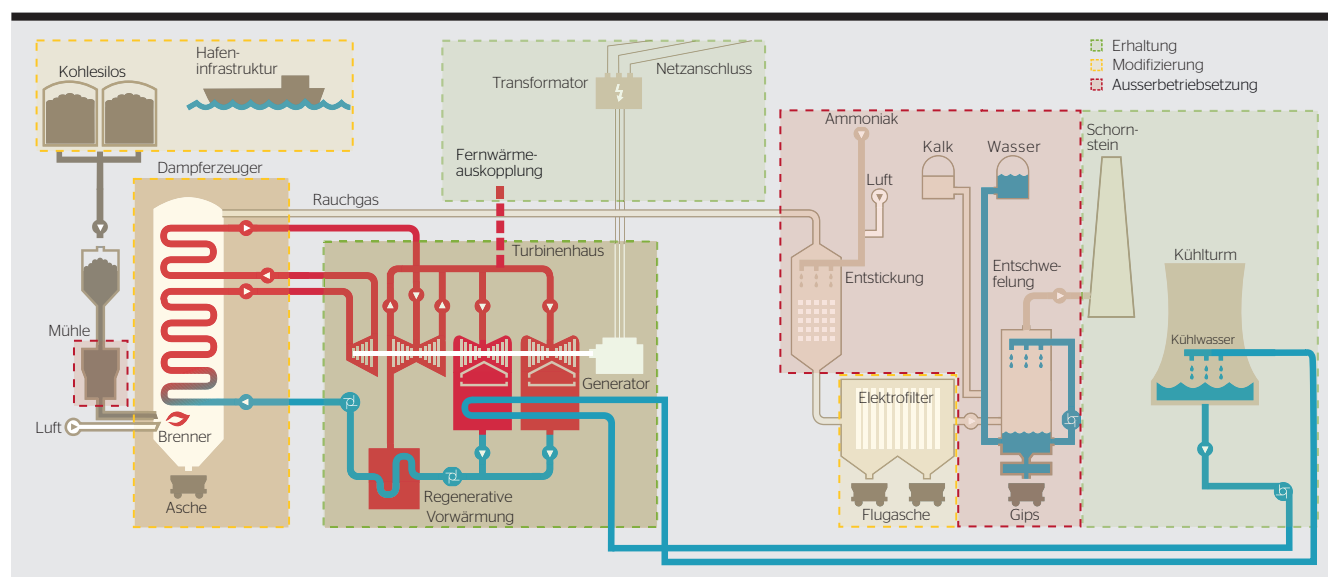


Bild 3 Modifiziertes Funktionsschema des Trianel Kohlekraftwerks Lünen. Einteilung der Kraftwerkskomponenten nach ihrer Weiterverwendbarkeit.

das Karlsruher Institut für Technologie gemeinsam mit industriellen Partnerkonsortien an den nächsten Schritten für eine Markteinführung.

Für Europa bieten diese Technologien die Chance, eine führende Rolle in einem zukunftssträchtigen Bereich der Energietechnik einzunehmen und gleichzeitig massgeblich zur Erreichung der Klimaziele beizutragen. Die Möglichkeit, bestehende milliarden-schwere Infrastrukturen weiter zu nutzen und gleichzeitig eine CO₂-freie, regelbare Energieversorgung zu etablieren, ist volkswirtschaftlich und strategisch wichtig.

Die Transformation von Kohle- zu Eisenkraftwerken eröffnet die Chance, die Dekarbonisierung des Stromsektors zu beschleunigen, die Versorgungssicherheit zu erhöhen und neue Wertschöpfungsketten zu schaffen. Um das volle Potenzial dieser «eisenen Reserve» für die Energiewende auszuschöpfen, braucht es weitere Forschung, gezielte Entwicklung und unterstützende politische Rahmenbedingungen.

Referenzen

- [1] G. Euan, F. Nicolas, A. Katye, Global Electricity Review 2025, Ember, 2025.
- [2] R. Y. Cui, et al., «Quantifying operational lifetimes for coal power plants under the Paris goals», Nature Communications 10, 1, S. 4759, 2019.
- [3] P. Debiagi, et al., «Iron as a sustainable chemical carrier of renewable energy: Analysis of opportunities and challenges for retrofitting coal-fired power plants», Renewable and Sustainable Energy Reviews 165, S. 112579, 2022.
- [4] J. M. Bergthorson, «Recyclable metal fuels for clean and compact zero-carbon power», Progress in Energy and Combustion Science 68, S. 169-196, 2018.
- [5] P. Julien, J. M. Bergthorson, «Enabling the metal fuel economy: green recycling of metal fuels», Sustainable Energy & Fuels 3, S. 615-625, 2017.
- [6] J. M. Bergthorson, et al., «Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power», Applied Energy 160, S. 368-382, 2015.
- [7] «Global Coal Plant Tracker», Global Energy Monitor, online, Januar 2025.
- [8] L. Dressler, et al., «Iron as energy carrier in a carbon-free circular energy economy», 2025.
- [9] J. Janicka, et al., «The potential of retrofitting existing coal power plants: A case study for operation with green iron», Applied Energy 339, S. 120950, 2023.
- [10] J. Neumann, et al., «Thermodynamic assessment of an iron-based circular energy economy for carbon-free power supply», Applied Energy 368, S. 123476, 2024.
- [11] J. Neumann, et al., «Techno-economic assessment of long-distance supply chains of energy carriers: Comparing hydrogen and iron for carbon-free electricity generation», Applications in Energy and Combustion Science 14, S. 100128, 2023.
- [12] Securing Green Hydrogen for the German Power Sector. Technology readiness & techno-economic feasibility study for three hydrogen value chains, DNV, Report Number 00360593-EMS 24-1809, 2024.

- [13] M. Müller, M. Pfeifer, D. Holtz, K. Müller, «Comparison of green ammonia and green hydrogen pathways in terms of energy efficiency», Fuel 357, S. 129843, 2024.
- [14] Christoph Kost, et al., Studie «Stromgestehungskosten erneuerbare Energien», Fraunhofer ISE, Juli 2024.

Autoren

Jannik Neumann forscht am Fachgebiet Technische Thermodynamik an der TU Darmstadt.
→ TU Darmstadt, DE-64287 Darmstadt
→ neumann@ttd.tu-darmstadt.de

Dr.-Ing. **Marius Schmidt** ist Geschäftsführer des Metal Energy Hubs an der TU Darmstadt.
→ schmidt@rsm.tu-darmstadt.de

Dr.-Ing. **Arne Scholtissek** forscht am Fachgebiet Simulation reaktiver Thermo-Fluid Systeme an der TU Darmstadt.
→ scholtissek@stfs.tu-darmstadt.de

Prof. Dr. habil. **Andreas Dreizler** leitet das Fachgebiet Reaktive Strömungen und Messtechnik der TU Darmstadt.
→ dreizler@rsm.tu-darmstadt.de

Prof. Dr.-Ing. **Christian Hasse** leitet das Fachgebiet Simulation reaktiver Thermo-Fluid Systeme an der TU Darmstadt.
→ hasse@stfs.tu-darmstadt.de

Prof. Dr.-Ing. **Peter Stephan** leitet das Institut Technische Thermodynamik der TU Darmstadt.
→ pstephan@ttd.tu-darmstadt.de

Die Autoren danken Prof. em. Johannes Janicka für die thermodynamische Analyse der Umrüstung eines Kohlekraftwerks. Teile der Arbeit wurden im Clusterprojekt Clean Circles und dem Metal Energy Hub durchgeführt und vom Land Hessen (HMWK, HMWEVW) sowie von der Europäischen Union (EFRE) kofinanziert.

RÉSUMÉ

Brûler du fer «vert» à la place du charbon

Conversion des centrales à charbon

La transition énergétique nécessite de renoncer autant que possible à l'utilisation de combustibles fossiles. Avec l'abandon de la production d'électricité à partir du charbon, la transformation du système énergétique nous place devant deux défis majeurs : premièrement, que faire des infrastructures existantes et onéreuses des centrales à charbon ? Environ deux tiers de la capacité mondiale de production d'électricité à partir du charbon proviennent de centrales qui ont moins de 20 ans. Pour atteindre les objectifs climatiques de l'accord de Paris, bon nombre de ces centrales devraient être mises hors service bien plus tôt que prévu. Cela entraînerait une perte considérable d'actifs et susciterait une opposition de la part des parties prenantes concernées. Deuxièmement, la transition vers un système énergétique fortement tributaire de sources renouvelables volatiles, telles que le soleil et le vent, nécessite des solutions inno-

vantes pour le stockage d'énergie à grande échelle ainsi que des systèmes de secours capables de couvrir la charge de base afin de garantir la sécurité de l'approvisionnement à tout moment.

Une solution prometteuse pour relever ces défis consiste à utiliser des métaux réactifs à la place du charbon dans les centrales à charbon. Le fer «vert», produit à partir d'énergies renouvelables, suscite notamment un intérêt croissant en tant que source d'énergie recyclable et sans carbone. L'idée consiste à brûler ce fer sous forme de poudre dans des centrales à charbon modifiées afin de produire de l'électricité sans émissions de CO₂. Actuellement, ces technologies basées sur des sources d'énergie métalliques en sont encore au stade de la recherche et du développement (niveau de maturité technologique 5-6), mais de nets progrès ont déjà été réalisés.