

Auf dem Weg zur klimaneutralen Industrie – Herausforderungen und Strategien

1. Industrietransformation: Herausforderung und Chance

Die Transformation der Industrie hin zur Klimaneutralität ist von entscheidender Bedeutung für das Erreichen der Klimaziele und das zukünftige Energiesystem. Die Industrie ist für ein knappes Viertel der Treibhausgas(THG)-Emissionen in Deutschland verantwortlich (Prognos et al., 2020). Trotz Effizienzsteigerungen stagnieren die Emissionen der Industrie seit 2010 auf einem hohen Niveau. Aufgrund des großen Anteils prozessbedingter Emissionen sowie des hohen Bedarfs an Hochtemperaturprozesswärme sind THG-Emissionsreduzierungen in diesem Sektor schwierig umzusetzen.

Die Grundstoffindustrie (Eisen und Stahl, Zement und Chemie) macht über die Hälfte der industriellen Emissionen aus. Deshalb sind Schlüsseltechnologien, welche die Emissionen dieser Sektoren nahe Null bringen können (Low Carbon Breakthrough Technologies), von zentraler Bedeutung (► *Abbildung 1*). Solche Schlüsseltechnologien sind grundsätzlich verfügbar und stehen zum Teil kurz vor der großtechnischen Anwendbarkeit (Agora Energiewende und Wuppertal Institut, 2019).

Beispiele sind die Nutzung von sauberem Wasserstoff zur Direktreduktion in der Stahlproduktion oder als Rohstoff in der Chemieindustrie und die CO₂-Abscheidung und -speicherung in der Zementindustrie.

Darüber hinaus können neue Produktionsverfahren Emissionen reduzieren, die nicht der Industrie selbst zugerechnet werden, beispielsweise Emissionen, die in der Vorkette oder bei der Nutzung oder Entsorgung ihrer Produkte anfallen.

Insgesamt existieren vielfältige Klimaschutzstrategien in der Industrie, die insbesondere durch Reduktion des Ressourcenbedarfs, Wechsel zu erneuerbaren Energieträgern, und Abscheidung und Speicherung unvermeidbarer Emissionen wirken können (► *Abbildung 2*).

Die Umsetzung dieser Strategien erfordert strukturelle Änderungen im Energiesystem. Insbesondere werden große zusätzliche Mengen an erneuerbarem Strom und nicht-fossiler Kohlenstoff für die Produktion von synthetischen Energieträgern und Rohstoffen benötigt. Kohlenstoffkreisläufe müssen geschlossen werden. Aufgrund des begrenzten heimischen Potentials

an erneuerbarem Strom und aufgrund von Hindernissen bei dessen Ausschöpfung ist davon auszugehen, dass auch in Zukunft Energieimporte eine große Rolle spielen werden.

2. Technologische Strategien

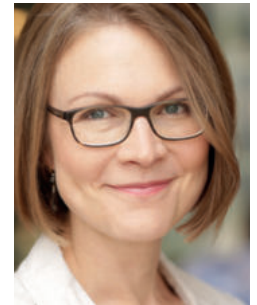
Der vorliegende Beitrag setzt einige exemplarische Schlaglichter auf die Forschung im FVEE zu Strategien für die Industrietransformation ohne den Anspruch, diese vollständig darzustellen.

2.1. Kreislaufwirtschaft

Einige Kunststoffabfälle sind mechanisch nicht wiederverwertbar. Anstatt diese Abfälle zu verbrennen, kann chemisches Recycling eine Lösung für die Wiederverwertung sein. Beim chemischen Recycling werden Kunststoffe gesammelt, sortiert und durch Pyrolyse in ihre molekularen Bausteine gespalten. Pyrolyseöl kann dann zum Beispiel durch Steamcracking in neue Rohstoffe für die Produktion von High Value Chemicals überführt werden.

Insbesondere aufgrund vergleichsweise geringer Kosten kann das chemische Recycling attraktiv sein, um Kohlenstoffkreisläufe zu schließen und Treibhausgasemissionen zu vermeiden (Agora Energiewende und Wuppertal Institut, 2019). Allerdings sind Verfahren zum chemischen Recycling technologisch noch nicht ausgereift. Weitere Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen sowie Nachhaltigkeitsbewertungen sind erforderlich.

Auch bei anderen Materialien trägt eine verstärkte Kreislaufführung dazu bei, den Energie- und Ressourcenbedarf zu senken und Emissionen zu reduzieren. Modellierungsstudien zufolge ist ein verstärktes Recycling – neben der Umstellung der Stahlprimärproduktion auf die Direktreduktion – ein zentraler Hebel, um die Stahlproduktion in Deutschland klimaneutral zu machen (Kullmann et al., 2020; Prognos et al., 2020). Nach Modellrechnungen des Forschungszentrums Jülich (FZJ) steigt der Recyclinganteil bei Stahl von heute etwa 40 auf etwa 70 Prozent in 2050. Die Entwicklung hängt dabei maßgeblich von den Kostenannahmen für Wasserstoffimporte und Stahlschrott ab.



Wuppertal Institut

Dr. Anna Leipprand
anna.leipprand@wupperinst.org

Dr. Sascha Samadi
sascha.samadi@wupperinst.org

Dr. Georg Holtz
georg.holtz@wupperinst.org

Clemens Schneider
clemens.schneider@wupperinst.org

DBFZ
Dr. Volker Lenz
volker.lenz@dbfz.de

UFZ
Matthias Jordan
matthias.jordan@ufz.de

DLR
Dr. Tom Lorenz
tom.lorenz@dlr.de

Prof. Dr. Robert Pitz-Paal
robert.pitz-paal@dlr.de

FZ Jülich
Dr. Manuel Dahmen
m.dahmen@fz-juelich.de

Dr. Martin Robinius
martin.robinius@umlaout.com

Dr. Thiemo Pesch
t.pesch@fz-juelich.de

Fritz Röben
f.roeben@fz-juelich.de

Dr. Peter Markewitz
p.markewitz@fz-juelich.de

Fraunhofer ISE
Dr. Peter Nitz
peter.nitz@ise.fraunhofer.de

ISFH
Dr. Raphael Niepelt
niepelt@isfh.de

KIT
Prof. Dr. Roland Dittmeyer
roland.dittmeyer@kit.edu

Prof. Dr. Dieter Stapf
dieter.stapf@kit.edu

Abbildung 1
Low Carbon Breakthrough Technologien

für die Grundstoffindustrie

(Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2019.)

Low Carbon Technologien nach Grundstoffindustrien	mögliche technische Verfügbarkeit
Stahl	
Direktreduktion mit Wasserstoff und Einschmelzen im Elektrolichtbogenofen	2025-2030 (evtl. Einstieg mit Erdgas)
Chemie	
Wärme- und Dampferzeugung aus Power-to-Heat (Wärmepumpen und Heizkessel)	Ab 2020
Grüner Wasserstoff aus Elektrolyse (Ersatz-Dampfpreformierung)	2025-2035
Methanol-to-Olefin/-Aromaten-Route	2025-2030
Chemisches Recycling	2020-2030
Zement	
CO ₂ -Abscheidung mit Oxyfuel-Verfahren (CCS)	2025-2030
CO ₂ -Abscheidung und Elektrifizierung der Hochtemperaturwärme am Kalzinator	2030-2035
Alternative Bindemittel	2020-2030 (je nach Produkt)

2.2. Wasserstoff

Grüner Wasserstoff kann für die Transformation der Industrie eine entscheidende Rolle spielen.

Mögliche Einsatzmöglichkeiten sind:

- der Ersatz für fossile Reduktionsmittel
- der Einsatz als Rohstoff wie etwa für die Produktion von Ammoniak oder synthetischen Kohlenwasserstoffen
- der Einsatz als CO₂-neutraler Energieträger für die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme und Dampf (Lechtenbömer et al., 2019).

Neben der Nutzung in Direktreduktionsanlagen zur Stahlproduktion kann grüner Wasserstoff auch dazu genutzt werden, CO₂-armes Kupfer herzustellen. Röben et al. (2020) modellieren ein System, bei dem grüner Wasserstoff sowohl für die Bereitstellung von Hochtemperatur-Prozesswärme als auch als Reduktionsmittel in der Kupferproduktion eingesetzt wird. Wasserstoff wird durch Elektrolyse mit erneuerbarem Strom bereitgestellt; der als Nebenprodukt anfallende Sauerstoff kann direkt in der Kupferproduktion genutzt werden. Die CO₂-Vermeidungskosten werden in

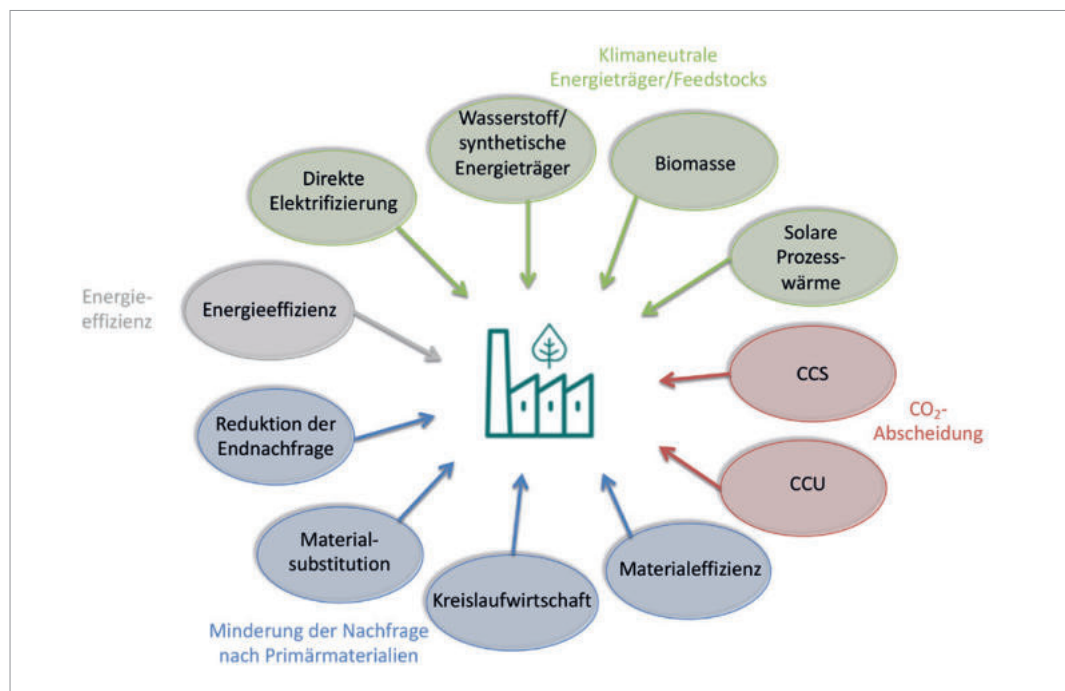


Abbildung 2:
Bandbreite der Strategien

für eine klimaneutrale Industrie

(Quelle: Wuppertal Institut)

erster Linie durch den Strompreis beeinflusst. Die Kostenersparnis durch die Nutzung des Sauerstoffs aus der Elektrolyse kann einen Teil der Mehrkosten ausgleichen. Für die Emissionsbilanz ist ebenfalls der genutzte Strom entscheidend. Erst ab einem Emissionsfaktor für Strom von unter 160 g CO₂/kWh trägt das System insgesamt zu einer Emissionsreduktion bei. Bei einem Strommix wie dem heutigen in Deutschland mit einem Emissionsfaktor von 400 g CO₂/kWh würden sich die Gesamtemissionen sogar erhöhen. Eine Umsetzung wäre dementsprechend nur unter veränderten Rahmenbedingungen ökonomisch und ökologisch sinnvoll.

Die standortspezifischen Wasserstoffgestehungskosten sind für die zukünftige geografische Verteilung einer Erzeugungsinfrastruktur relevant (Merten et al., 2020a). Am Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH) wurden Wasserstoffgestehungskosten für den Standort Salzgitter-Watenstedt und eine mögliche Versorgung des dortigen Stahlwerks durch Wind-Solar-Wasserstoff untersucht. Die Simulation in stündlicher Auflösung zeigt, dass die Kombination von Solar- und Windenergie 4000 bis 5500 Betriebsstunden der Elektrolyse pro Jahr bei einer Abregelung von unter 10 Prozent ermöglicht. Die nach wie vor bestehenden großen Kostensenkungspotenziale sowohl bei den Technologien zur Erzeugung erneuerbarer Energie als auch bei der Elektrolyse können längerfristig zu geringeren Unterschieden bei Wasserstoffgestehungskosten im In- und Ausland führen und solche Inselssysteme zu Wasserstoffherzeugung im Inland zunehmend attraktiv machen (Niepelt und Brendel, 2020).

2.3. Erneuerbare Prozesswärme

Erneuerbare Prozesswärme ist als Lösung insbesondere für Hochtemperaturprozesse derzeit noch nicht umfassend verfügbar bzw. wettbewerbsfähig und wird deshalb in Szenariostudien kaum berücksichtigt. Im FVEE wird erneuerbare Prozesswärme intensiv beforscht. Sie könnte perspektivisch einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung der Industrie leisten.

Etwa die Hälfte des industriellen Wärmebedarfs erfordert Temperaturen bis 500 °C, die andere Hälfte über 500 °C (de Boer et al., 2020). Für die Temperaturbereiche bis 500 °C stehen bereits solare Technologien zur Verfügung, die jedoch teilweise weiterer F&E-Anstrengungen bedürfen. Weitere Lösungen sind Gegenstand aktueller Forschung.

Am DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse in Cottbus wird z. B. eine innovative Hochtemperaturwärmepumpe entwickelt, die Temperaturen von 250 bis 550 °C erreichen soll¹⁾ (► *Abbildung 3*). Bisher können Wärmepumpen nur Temperaturen bis maximal 165 °C bereitstellen. Durch die höheren Temperaturen lässt sich ein Teil der fossil erzeugten Prozesswärme in der Industrie elektrifizieren.

Auch Temperaturbereiche über 500 °C können mit solaren Kollektortechnologien adressiert werden. Während moderne Flüssigsalzsysteme Wärme im Bereich bis zu 500 °C bereitstellen können, wird für höhere Temperaturen an Partikelsystemen geforscht, etwa beim DLR-Institut für Solarforschung in Köln-Porz (Ebert et al., 2019).²⁾ Mittels eines Heliostatenfelds werden im Receiver kleine Bauxit-Partikel auf

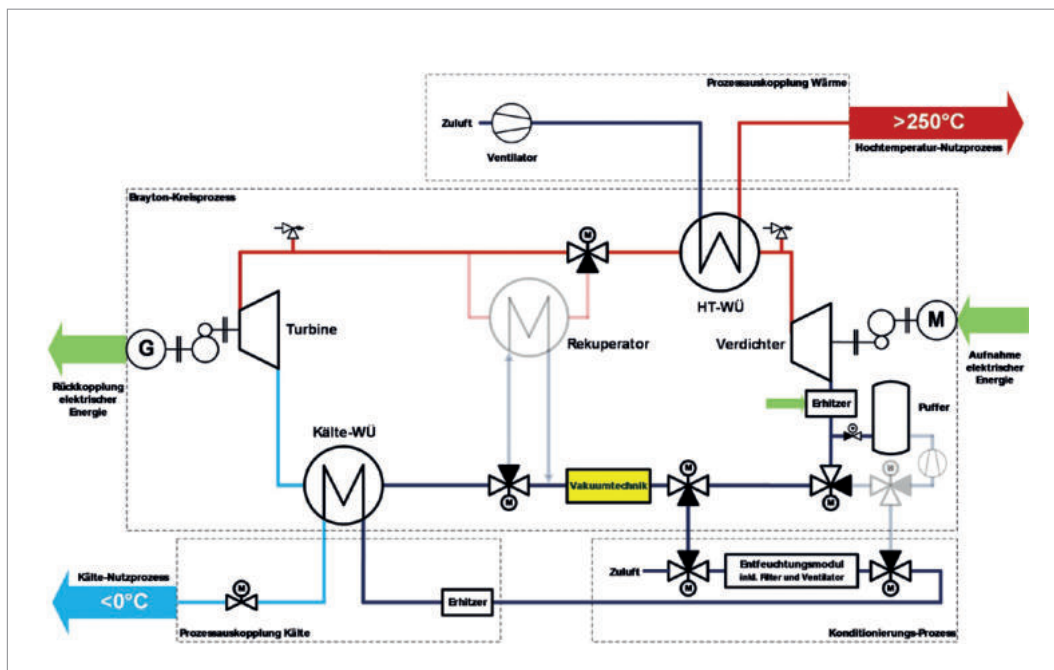
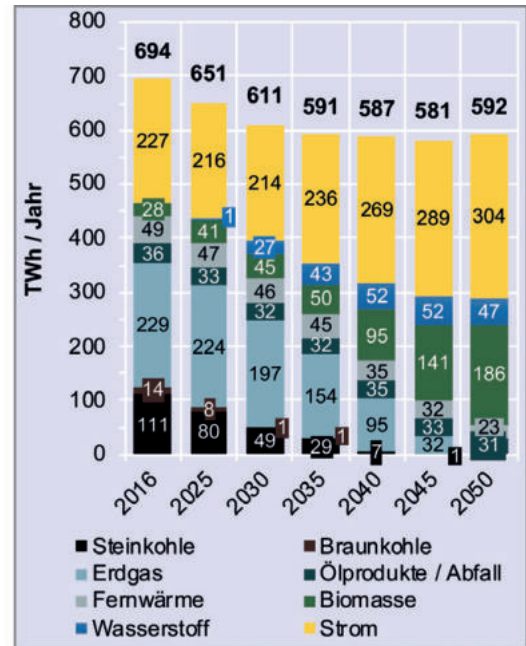
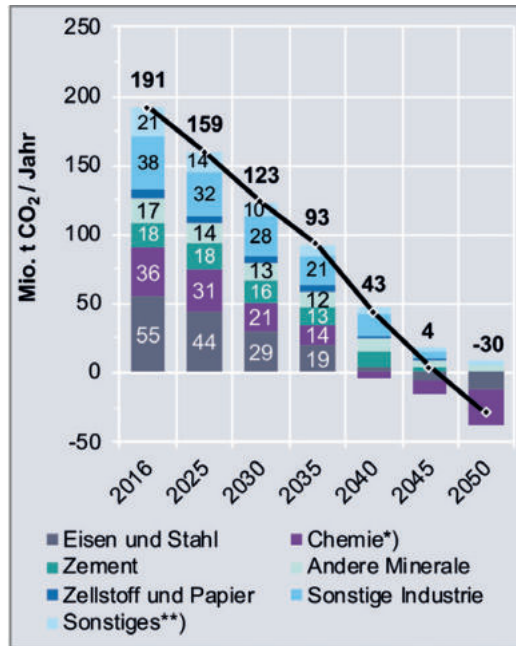


Abbildung 3:
Hochtemperaturwärmepumpe:
CO₂-neutrale Prozesswärme von 250 bis 550 °C.
Planung des ersten Prototyps am DLR in Cottbus

(Quelle: DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse)

Abbildung 4:
Auswirkungen der Strategien für klimaneutrale Industrien bis 2050:
 links: Reduktion der CO₂-Emissionen
 rechts: Höhe und Zusammensetzung des Energiebedarfs
 (Quelle: Agora Energiewende & Wuppertal Institut 2020).



Temperaturen bis zu 1000 °C erhitzt. Die heißen Partikel können in einem Behälter bei Atmosphärendruck gespeichert werden. Die Wärmeauskopplung an einen Industrieprozess erfolgt durch Partikel-Wärmeübertrager, beispielsweise an einen Luftstrom. Diese Technologie wird auch weltweit in einer Reihe von Projekten entwickelt.

In dem vom Fraunhofer ISE koordinierten EU-Projekt INSHIP (Integrating National Research Agendas on Solar Heat for Industrial Processes)³⁾ vernetzt sich die europäische Forschung zur Nutzung solarer Prozesswärme in der Industrie und erarbeitet eine European Common Research and Innovation Agenda.

2.4. Bioenergie

Aktuelle Forschung aus dem FVEE legt nahe, dass das begrenzt vorhandene nachhaltige Biomassepotenzial zu deutlich größeren Anteilen als bisher in der Industrie eingesetzt werden sollte.

- Derzeit werden in Deutschland etwa 0,1 Exajoule (EJ) Biomasse für die Wärmebereitstellung unter 200 °C im Industriebereich, v. a. in der Holzverarbeitenden und in der Lebensmittelindustrie, eingesetzt.
- Weitere 0,4 EJ werden für die Wärmebereitstellung von Haushalten genutzt.
- Die restlichen 0,5 EJ des nachhaltigen Biomassepotenzials werden bereits teilweise im Stromsektor und Mobilitätssektor verwendet.

Für eine effiziente Energiewende sollte Biomasse aber in Zukunft dort eingesetzt werden, wo sie einen möglichst großen Zusatznutzen erzeugen kann (Lenz et al., 2020). Dies ist insbesondere bei industrielle Anwendungen der Fall, etwa durch

- Beiträge zur Versorgungssicherheit bei ergänzendem Einsatz zu solarer Prozesswärme bei Temperaturen unter 200 °C
- Einsatz als Rohstoff mit speziellen Prozesseffekten (Biokoks als Kohlenstoffquelle in der Stahlproduktion per Wasserstoff-Direktreduktion; Asche als Zuschlagsstoff für Zement)
- Erzeugung negativer Emissionen bei Kopplung mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung oder -Nutzung (Bioenergy with Carbon Capture and Storage or Utilisation, BeCCS/U)
- Umstellung fossil basierter Prozesse (z. B. Kunststoffproduktion) auf biogenen Rohstoffeinsatz und systemdienliche energetische Nutzung der neu anfallenden biogenen Reststoffe am Standort (Bioökonomie)

Eine techno-ökonomische Modellierung des Wärmemarktes unter der Bedingung der Erfüllung der Klimaziele bestätigt: Die kostenoptimale Verwendung von Biomasse im Wärmesektor besteht langfristig – neben einigen anderen systemstabilisierenden Einsatzmöglichkeiten im Rahmen der Sektorkopplung – überwiegend in Hochtemperaturanwendungen in der Industrie. Diese Lösung wurde unter den gegebenen Unsicherheiten im Rahmen einer umfangreichen Sensitivitätsanalyse als robust identifiziert (Jordan et al., 2020). Eine aktuelle Modellierungsstudie, in der Deutschland bis 2050 klimaneutral wird, erreicht die hierfür notwendigen negativen Emissionen durch den Einsatz von BeCCS (Prognos et al., 2020).

3. Strukturelle Auswirkungen

Die Umsetzung der Strategien für die Industrietransformation wird, zusammen mit Veränderungen in den anderen Sektoren, erhebliche Auswirkungen auf Höhe und Zusammensetzung des Energiebedarfs und auf Energieerzeugungs- und transportstrukturen haben. Modellrechnungen des FZ Jülich (Robinius et al., 2020) und des Wuppertal Instituts (Prognos et al., 2020) zufolge verschwinden fossile Energieträger sukzessive aus dem Energiemix. Biomasse, Strom und Wasserstoff werden zu tragenden Säulen der industriellen Energieversorgung, die weiterhin – bei nur leicht sinkendem Bedarf – erhebliche Mengen umfasst (► *Abbildung 4*).

Der Wechsel der Energieträger macht eine Analyse der nötigen Infrastruktur erforderlich. Eine aktuelle wissenschaftliche Diskussion dreht sich etwa um die Frage, an welchen Standorten Elektrolysekapazitäten aufgebaut werden sollten, und welche Transportinfrastrukturen notwendig sein werden, um Wasserstoff zu den Verbrauchsorten zu transportieren (z. B. Merten et al., 2020a). Analysen des FZ Jülich legen nahe, dass Elektrolyseure zur Produktion großer Wasserstoffmengen, etwa für die Stahl-Direktreduktion, dort platziert werden sollten, wo viel Windstrom erzeugt wird, da es sonst zu Netzengpässen im Stromsystem kommt (Görner et al., 2018).

Wenn große Mengen von grünem Wasserstoff in Regionen mit hoher EE-Stromerzeugungsleistung produziert und große Mengen Wasserstoff importiert werden, wird der Aufbau einer groß angelegten Wasserstoffinfrastruktur notwendig. Studien von Instituten im FVEE skizzieren Randbedingungen und mögliche Ausgestaltungen von Pipelinenetzen (Robinius et al., 2020, S. 448; Merten et al., 2020b).

Darüber hinaus können die genannten Maßnahmen zur Industrietransformation eine Reihe von Nebeneffekten hervorrufen, die es bei der Umsetzung zu berücksichtigen gilt. Mit der Umstellung auf Schlüsseltechnologien können beispielsweise Zwischenprodukte entfallen, die wiederum Ausgangsmaterial für andere Prozesse sind, wie z. B. die Hüttensande aus der konventionellen Stahlproduktion, die derzeit für die Zementherstellung genutzt werden. Zudem kann durch den Ersatz von fossilen Rohstoffen die Kohlenstoffquelle für Industrieprozesse verloren gehen. Dies betrifft bspw. die Harnstoffproduktion, die gegenwärtig CO₂ aus der vorgeschalteten Ammoniak-synthese als Kohlenstoffquelle nutzt.

4. Herausforderungen für die Politik

Damit die Transformation der Industrie gelingen kann, muss die Politik entsprechende Rahmenbedingungen schaffen und langfristig wirksame strategische Signale setzen.

- So muss etwa eine weitgehende Kreislaufwirtschaft mit möglichst geschlossenen Stoffströmen angereizt werden.
- Forschung zu neuen Technologien mit hohem Klimaschutzpotenzial muss weiter gefördert werden.
- Begrenzt verfügbare Energieträger wie Biomasse und Wasserstoff müssen effizient eingesetzt werden.
- Zudem stellt der Aufbau von Infrastruktur eine wesentliche Herausforderung dar, insbesondere da erhebliche Unsicherheiten bezüglich des zukünftigen Energie- und Rohstoffbedarfes bestehen.
- Von zentraler Bedeutung ist es, Investitionen in Schlüsseltechnologien rechtzeitig und auch bei noch nicht ausreichend hohem CO₂-Preis zu ermöglichen. Wegen der langen Lebensdauer von industriellen Anlagen müssen neue Investitionen bereits heute kompatibel mit der langfristig anvisierten Klimaneutralität sein (Agora Energiewende, 2020). Hierfür ist eine entsprechende Gestaltung von Märkten und Preissignalen in der EU ebenso notwendig wie die Gewährleistung von international fairen Wettbewerbsbedingungen.

Literatur

- Agora Energiewende (2020). A Clean Industry Package for the EU: Making sure the European Green Deal kick-starts the transition to climate-neutral industry. Berlin: Agora Energiewende.
- Agora Energiewende, Wuppertal Institut (2019). Klimaneutrale Industrie – Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin.
- de Boer, R., Marina, A., Zühlsdorf, B., Arpagaus, C., Bantle, M., Wilk, V., Elmegaard, B., Corberán, J., Benson, J. (2020). Strengthening Industrial Heat Pump Innovation – Decarbonizing Industrial Heat. Whitepaper, TNO.
- Ebert, M., Amsbeck, L., Rheinländer, J., Schlögl-Knothe, B., Schmitz, S., Sibum, M.
- Uhlig, R., Buck, R. (2019). Operational Experience of a Centrifugal Particle Receiver Prototype. AIP Conference Proceedings, 2126 (030018), SolarPACES 2018, 2.–5. Oct. 2018, Casablanca, Morocco.
<https://doi.org/10.1063/1.5117530>

- Görner, K., Lindenberger, D. (Hrsgb.) (2018). Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme – Flexibilisierungsoptionen im Strom-Gas-Wärme-System, Abschlussbericht, Band I, <http://strom-zu-gas-und-waerme.de/wp-content/uploads/2018/11/Virtuelles-Institut-SGW-Band-I-Systemanalyse.pdf>
- Jordan, M., Millinger, M., Thrän, D. (2020). Robust bioenergy technologies for the German heat transition: A novel approach combining optimization modeling with Sobol' sensitivity analysis, *Applied Energy*, 262, p. 114534. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114534>.
- Kullmann, F., Markewitz, P., Robinius, M., Stolten, D. (2020). Modellgestützte Analysen von Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft im deutschen Energiesystem, 16. Symposium Energieinnovation 2020, Graz, 13.2.2020.
- Lechtenböhrer, S., Samadi, S., Leipprand, A., Schneider, C. (2019). Grüner Wasserstoff – das dritte Standbein der Energiewende?, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 69. Jg.(10), pp. 10–13.
- Merten, F., Scholz, A., Krüger, C., Heck, S., Girard, Y., Mecke, M., Goerge, M. (2020a). Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung. Wuppertal, Berlin: Wuppertal Institut, DIW Econ.
- Merten, F., Lechtenböhrer, S., Krüger, C., Nebel, A., Schneider, C., Scholz, A., Taubitz, A. (2020b). Infrastructure needs for deep decarbonisation of heavy industries in Europe. Policy Brief. Wuppertal Institut.
- Niepelt, R. und Brendel, R. (2020). Erneuerbarer Wasserstoff mit Solar- Wind-Hybridkraftwerken. *gwf Gas + Energie* 7–8 2020, pp. 38–45.
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2020). Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität.
- Robinius, M., Markewitz, P., Lopion, P., Kullmann, F., Syranidis, K., Cerniauskas, S., Ryberg, S., Kotzur, L., Caglayan, D., Welder, L., Grube, T., Heinrichs, H., Stenzel, P., Stolten, D. (2020). Wege für die Energiewende. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050. Jülich: Forschungszentrum Jülich.
- Lenz, V., Szarka, N., Jordan, M. (2020). Status and Perspectives of Biomass Use for Industrial Process Heat for Industrialized Countries, (8), pp. 1469–1484. <https://doi.org/10.1002/ceat.202000077>
- Röben, F.T.C., Schöne, N., Bau, U., Reuter, M. A., Dahmen, M., Bardow, A. (2020). The Cost of Defossilization in Energy-Intensive Industries: Techno-Economic Analysis of Power-to-H₂ in Copper Production. 10. ProcessNet Jahrestagung. 21.–24.09.2020.

Fußnoten

- 1) <https://www.dlr.de/di/desktopdefault.aspx/tabid15753/>
- 2) https://www.dlr.de/sf/de/desktopdefault.aspx/tabid-13616/23737_read-54442/
- 3) <https://inship.psa.es/>