

Industrielle Prozesswärme im Kontext eines treibhausgasneutralen Energiesystems – Ein Szenarienvergleich

Georg Holtz, Felix Kullmann, Jochen Linßen, Clemens Schneider, Dietmar Schüwer und Detlef Stolten

Die Bereitstellung industrieller Prozesswärme ist eine zentrale Herausforderung für ein zukünftiges, treibhausgasneutrales Energiesystem. Durch einen Vergleich der Prozesswärmebereitstellung in zwei Energieszenarien werden Gemeinsamkeiten, die auf Richtungssicherheit hindeuten, dargestellt, sowie methodische und inhaltliche Gründe für Abweichungen herausgearbeitet.

Im Jahr 2021 wurden in Deutschland laut AG Energiebilanzen 472 TWh Energie für industrielle Prozesswärme eingesetzt. Dies entspricht 20 % des gesamten deutschen Endenergiebedarfs. Bisher wird nur ein Bruchteil der Prozesswärme aus regenerativen Energien bereitgestellt, weshalb der Transformation der Bereitstellung industrieller Prozesswärme für den Übergang zu einem treibhausgasneutralen Energiesystem eine zentrale Rolle zukommt.

Technologien sind verfügbar

Bereits heute sind Technologien für die Prozesswärmebereitstellung am Markt vorhanden bzw. werden in naher Zukunft verfügbar werden, die eine deutliche Minderung der Treibhausgas (THG)-Emissionen gegenüber dem Status quo ermöglichen bzw. die gänzlich (lokal) THG-neutral sind. Der Artikel von Dietmar Schüwer und Georg Holtz im Anschluss an diesen Beitrag in dieser „et“ diskutiert die technischen Möglichkeiten zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärmeerzeugung mit Hilfe erneuerbarer Wärmequellen (Geothermie, Solarthermie), unvermeidlicher Abwärme, erneuerbaren Stroms (Wärmepumpen, elektrische Dampfkessel, u.a.), Biomasse (einschließlich Biogase) sowie alternativer Energieträger (insbesondere Wasserstoff und synthetisches Methan).

Szenarienvergleich

Um einen möglichst optimalen Einsatz im Industriesektor zu gewährleisten, müssen die technischen und ökonomischen Eigenschaften sowie die Auswirkungen der verschiedenen Technologien aus Systemperspektive betrachtet werden. Welche dieser Technologien wann



Blick in die Brennkammer des Drehrohrofens einer Zementfabrik; im Artikel werden verschiedene Szenarien hinsichtlich der Bereitstellung industrieller Prozesswärme verglichen

Bild: Adobe Stock

auf der Zeitachse für welche Prozesse bzw. Anwendungsfelder aus systemischer Sicht vorteilhaft nutzbar sind, hängt z.B. von Interaktionen mit dem Stromsystem sowie den Hochlaufpfaden einer H₂- bzw. CO₂-Infrastruktur ab.

Die Einordnung von Technologien in den Systemkontext wird durch Energiesystemmodelle und Szenarien geleistet. Im Folgenden vergleichen wir die Ergebnisse zweier Szenariostudien, die wir hier nach den Instituten, die sie erstellt haben, als *FZJ* und *WI* bezeichnen. Die Szenarien gehen bzgl. der Herleitung der Prozesswärmebereitstellung verschiedene methodische Wege (s. Box).

Wir vergleichen die Szenarien *FZJ* und *WI* hinsichtlich der Bereitstellung industrieller Prozesswärme für ausgewählte energiein-

tensive Hochtemperaturprozesse (Eisenherstellung, Steamcracker, Zementklinkeröfen, Glasschmelze) und für die Bereitstellung von Prozessdampf als Querschnittsaufgabe für das Jahr 2030 sowie für das treibhausgasneutrale Zielsystem (*FZJ*: 2045 für Deutschland; *WI*: 2050 für die EU-27), jeweils für Deutschland. Dabei erfolgt eine gesonderte Betrachtung der Prozessdampfbereitstellung der Chemie- und der Papierindustrie, um deren hohen Energiebedarfen gerecht zu werden sowie die für die Dampfbereitstellung nutzbaren Reststoffe und Beiprodukte dieser Branchen erfassen zu können. Daneben gibt es vielfältige weitere Hochtemperaturprozesse, die wir aufgrund ihrer Diversität und des unterschiedlichen Detailgrads der Darstellung in den Szenarien im Rahmen dieses Artikels nicht näher betrachten können (s. Abb.).

Eisenherstellung

Für die Reduktion von Eisenerz setzen beide Szenarien (langfristig) auf die wasserstoffbasierte Direktreduktion (DRI-H₂) in Schachtofen. Unterschiede gibt es bzgl. der erwarteten Geschwindigkeit des Hochlaufs der Technologie und des damit einhergehenden Auslaufens der Hochöfen, die von der erwarteten restlichen Lebensdauer der Hochöfen sowie von verschiedenen unsicheren Faktoren abhängen: der Verfügbarkeit von Wasserstoff und einer H₂-Infrastruktur sowie von politischen Rahmenbedingungen.

Steamcracker

In beiden Szenarien wird die Steamcracker-Route langfristig durch andere Routen zur Herstellung von Olefinen und Aromaten ergänzt, die hier jedoch nicht weiter betrachtet wurden. Steamcracker spielen jedoch in beiden Szenarien auch langfristig eine Rolle.

Im *WI*-Szenario importiert die deutsche Chemieindustrie langfristig CO₂-neutralen Feedstock (Naphtha) aus globalen Sweet-Spots mit hervorragenden Bedingungen für erneuerbare Energien. Diese „grünen“ Feedstocks werden dabei in Steamcrackern prinzipiell genauso verwendet wie der heutige fossile Feedstock – d.h. inklusive Nutzung der Beiprodukte für die Beheizung der Steamcracker. Durch eine CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS) an infrastrukturell günstig gelegenen Steamcrackern können durch diese Vorgehensweise zudem negative Emissionen erzeugt werden.

Das *FZJ*-Szenario nimmt langfristig eine Fortführung des aktuellen Imports von fossilem Naphtha und dessen Nutzung in heimischen Steamcrackern an. Die Steamcracker werden jedoch überwiegend elektrisch beheizt und die Beiprodukte werden anteilig stofflich genutzt. Nur der Anteil der Beiprodukte, die stofflich schwer nutzbar sind, wird weiterhin thermisch für die Beheizung der Steamcracker verwendet. Auch in diesem Szenario wird das (in diesem Fall fossile) CO₂ aus der Verbrennung der Beiprodukte abgeschieden.

Die Unterschiede zwischen den Szenarien lassen sich auf mindestens drei miteinander verwobene Annahmen zurückführen:

- ob grüne Feedstocks am Weltmarkt verfügbar sein werden;

- ob eine stoffliche Nutzung der Beiprodukte trotz des damit einhergehenden hohen Wasserstoffbedarfs in Deutschland wirtschaftlich erfolgen kann und
- ob eine Elektrifizierung der Steamcracker trotz der damit verbundenen hohen elektrischen Grundlast dem Gesamtsystem zuträglich ist.

Zementklinkeröfen

Bei den Klinkeröfen erfolgt im *FZJ*-Szenario langfristig eine Umstellung auf H₂ als zentralen Energieträger. Die heute in Zementwerken genutzten Abfallstoffe werden stattdessen in Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet und damit öffentliche Fernwärme und Strom bereitgestellt. Insgesamt werden im *FZJ*-Szenario im Jahr 2045 ca. 400 TWh Wasserstoff im Gesamtsystem benötigt, von denen ca. 38 TWh in der Zementindustrie eingesetzt werden. Er übernimmt nicht nur die Eigenschaft als CO₂-neutraler Energieträger, sondern bietet notwendige System-

dienstleistungen. Diese sind die saisonale Speicherung, die Überbrückung von kalten Dunkelflauten und die Entlastung von Stromnetzen bei gleichzeitiger Nutzung von bereits vorhandener Infrastruktur durch die Umstellung von Erdgas-Pipelines.

Der Einsatz von Wasserstoff in der Zementindustrie ist im *FZJ*-Szenario vor allem aus der Perspektive des optimierten Gesamtsystems zu verstehen und erscheint aus dieser Perspektive sinnvoll.

Im *WI*-Szenario werden hingegen auch langfristig abfallbasierte Brennstoffe als (aus Anwendersicht) günstige Option zur Bereitstellung von Hochtemperaturwärme für die Klinkeröfen eingesetzt. Aufgrund der prozessbedingten CO₂-Mengen, die bei der Klinkerherstellung aus der chemischen Umwandlung des Rohstoffs Kalkstein entstehen, erscheint eine CO₂-Abscheidung an Zementwerken unabhängig von den eingesetzten Energie-

Modell- und Szenarienbeschreibung

Dem Szenario *FZJ* liegt eine vollständig integrierte Kostenoptimierung aller Sektoren des Energiesystems zugrunde. Alle Technologien im Energiesystemmodell, so auch die Technologien zur Prozesswärmebereitstellung, wurden dabei unter anderem durch Investitionskosten, Alter und Lebensdauer, früheste Verfügbarkeit (bei innovativen zukünftigen Technologien) und technisches Potenzial anhand von Studien und im Austausch mit Expertinnen und Experten charakterisiert. Die so beschriebenen Technologien werden in ein Gesamtmodell integriert und müssen die exogen vorgegebenen Bedarfe (bspw. Stahlerzeugung im Jahr 2045) volkswirtschaftlich kostenoptimal decken. Dabei darf eine vorgeschriebene jährliche THG-Emissionsgrenze, die aus den Zielen des Klimaschutzgesetzes abgeleitet wird, im Gesamtsystem nicht überschritten werden.

„Neue Ziele auf alten Wegen? Strategien für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung bis zum Jahr 2045“ zu finden unter <https://www.fz-juelich.de/de/iek/iek-3/projekte/ksg2045-studie-fuer-deutschland>

Das Szenario *WI* wurde über einen Bottom-up-Ansatz entwickelt. Dabei wurde für jeden industriellen Subsektor unter Berücksichtigung aktueller Entwicklungen und Planungen in den Branchen, technischer Möglichkeiten, Alter und Lebensdauer besonders CO₂-intensiver bestehender individueller Anlagen, Szenarien für den Infrastrukturaufbau (H₂, CO₂) und des Stromsystems sowie Kostenbetrachtungen ein aus Expertensicht plausibler Pfad für die jeweilige Branche entwickelt. Hierfür wurde eine standortscharfe Datenbank der Anlagen der energieintensiven Industrie genutzt sowie insbesondere Branchenwissen aus langjährigem engem Austausch mit Industrieakteuren herangezogen. Die Branchenspuren wurden anschließend zu einem Gesamtbild für die Industrie integriert und die resultierenden Energiebedarfe und THG-Emissionen in ein Energiesystemmodell eingespeist.

„Gexit – Die Zukunft von fossilem Gas in der EU“ zu finden unter <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/2188>

Erklärung zum Szenarienvergleich

Die Bereitstellung von Prozesswärme erfolgt heute vielfach durch den Einsatz von Brennstoffen in Brennern. Da der Produktionsprozess an sich bei einer Änderung des Brennstoffeinsatzes im Kern unverändert bleiben kann, differenzieren wir die verschiedenen Brenntechnologien (sowie weitere periphere Anlagen wie Wärmetauscher etc.) in diesem Szenarienvergleich nicht, sondern vergleichen lediglich die verschiedenen eingesetzten Brennstoffe. Den zentralen Prozesswechsel in der Stahlindustrie vom Hochofen zum DRI-Schachtofen weisen wir jedoch explizit aus. Eine Differenzierung erfolgt ebenfalls für einen Technologiewechsel auf strombasierte Technologien, da eine Elektrifizierung häufig mit grundsätzlichen Veränderungen in den Produktionsprozessen sowie großen Wirkungsgradverbesserungen einhergeht. Erneuerbare Wärmequellen (Solarthermie, Geothermie, Umgebungswärme) sowie Abwärme spielen in den hier betrachteten Szenarien für die Prozesswärmebereitstellung eine untergeordnete Rolle und sind daher zusammen mit Kleinstmengen anderer Energieträger unter „Weitere“ zusammengefasst (s. Diskussion). Unter „Weitere“ ist auch die Fernwärme erfasst.

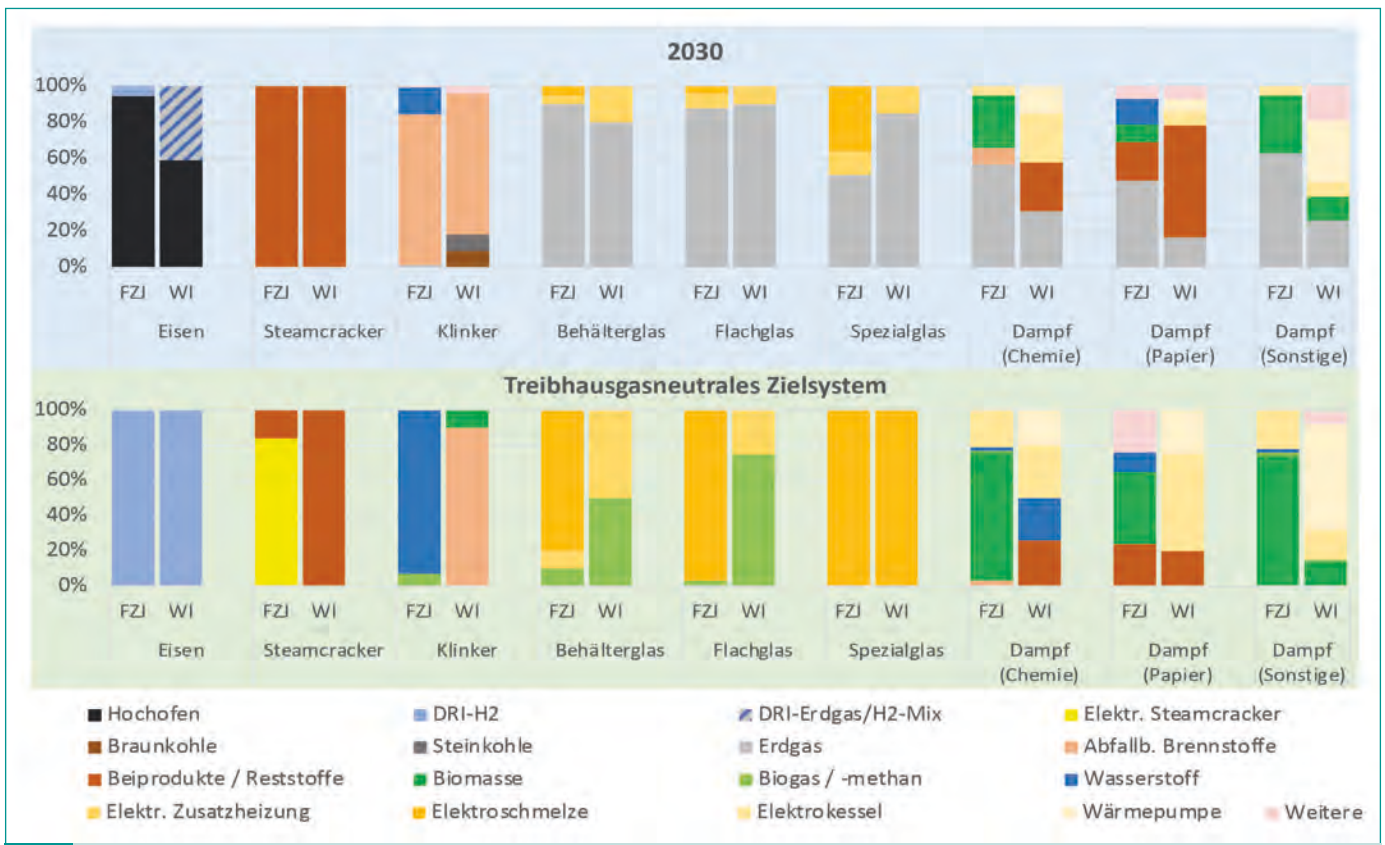


Abb. Vergleich der Bereitstellung industrieller Prozesswärme für ausgewählte Wärmebedarfe in Deutschland im Jahr 2030 und im treibhausgasneutralen Zielsystem 2045/2050. Dargestellt ist die prozentuale Bereitstellung von Nutzenergie durch verschiedene Technologien und Energieträger

Quelle: eigene Darstellung

trägern erforderlich. Entsprechend können die fossilen CO₂-Mengen aus abfallbasierten Brennstoffen ohne signifikanten zusätzlichen Infrastrukturaufwand abgeschieden und gespeichert werden. Mittels der biogenen Anteile der Abfallstoffe sowie durch ergänzend eingesetzte Biomasse können im selben Zuge negative Emissionen erzeugt werden.

Der Fokus auf eine wasserstoffbasierte Prozesswärmebereitstellung an Klinkeröfen erwächst im *FZJ*-Szenario aus der Gesamtsystemsicht mit Kostenoptimierung, so dass ein Herauslösen einzelner Faktoren als Erklärung der unterschiedlichen Perspektiven der Szenarien in diesem Fall nicht möglich ist. Unterschiede zwischen den Szenarien bestehen mindestens bzgl. der angenommenen Verfügbarkeit von H₂ an Standorten der Zementindustrie: das *WI*-Szenario geht davon aus, dass H₂ an den typischerweise abseits der industriellen Zentren gelegenen Standorten der Zementindustrie nicht verfügbar sein wird. Es wären zudem sehr weitgehende regulatorische Maßnahmen erforderlich, um den Einsatz größerer Mengen Wasserstoffs in Klin-

keröfen auch aus Anwendersicht wirtschaftlich zu machen. Auch aus diesem Grund wird diese Option im *WI*-Szenario nicht verfolgt.

Glasschmelzwannen

Im Glassektor besteht zwischen den Szenarien v.a. ein Unterschied bzgl. der Rolle der vollelektrischen Glasherstellung von Behälter- und Flachglas (Elektroschmelze). Das *FZJ*-Szenario sieht im großen Umfang und durchgängig für alle Glassorten eine vollständige Elektrifizierung und einen damit einhergehenden Neubau von Glasschmelzwannen vor. Dies liegt vor allem an der höheren thermischen Effizienz im Vergleich zu konventionellen Schmelzwannen, welche durch die direkte Einbringung der elektrischen Energie in das Schmelzgut über Elektroden erreicht wird. Der Effizienzgewinn der vollständigen Elektrifizierung ist mit Blick auf das gesamte Energiesystem vorteilhaft. Noch zu meisternde technische Voraussetzungen für einen zukünftigen großflächigen Einsatz von vollelektrischen Schmelzwannen sind zum einen eine verbesserte Skalierbarkeit und zum anderen eine Gewährleistung

einer gleichbleibend hohen Produktqualität für alle Glassorten.

Das *WI*-Szenario setzt stattdessen auf die Nachrüstung bestehender Schmelzwannen mit (erweiterter) elektrischer Zusatzheizung und den Einsatz regionalen (zu Biomethan veredelten) Biogases anstelle von Erdgas. Die Argumentation ist, dass der Einsatz von Biomethan aus technischer Sicht deutlich einfacher ist als eine (vollständige) Direktelektrifizierung oder der Einsatz von Wasserstoff. Der Einsatz von Biogas nimmt im Szenario in anderen Sektoren ab, wodurch Potenziale für die Anwendung in der Industrie frei werden. Eine zentrale Voraussetzung für den Einsatz von Biogas bzw. -methan in der Glasindustrie ist eine kontinuierliche und gesicherte Bereitstellung in ausreichender Menge, die gemäß *WI*-Szenario nach 2030 auf regionaler Ebene organisiert wird.

Prozessdampf

Für die Bereitstellung von Prozessdampf setzt das *WI*-Szenario langfristig Reststoffe aus der Papierherstellung bzw. Beiprodukte

aus den Steamcrackern, die nicht am Cracker selbst genutzt werden, im verfügbaren Umfang ein. Als Ausnahme hiervon wird die Schwarzlauge aus der Zellstoffherstellung langfristig stofflich statt thermisch genutzt. Daneben erfolgt im *WI*-Szenario aus Energieeffizienz-Erwägungen heraus v.a. eine starke Elektrifizierung. Im Temperaturbereich 100-200°C sieht das *WI*-Szenario dafür den Einsatz von energieeffizienten Wärmepumpen vor, für höhere Temperaturniveaus Elektrodenkessel. Die Standorte der Chemieindustrie sind gemäß *WI*-Szenario zudem an eine (überregionale) H²-Infrastruktur angeschlossen und H² wird zeitweise als Flexibilitätsoption anstelle von Elektrodenkesseln genutzt, um Zeiten hoher Strompreise zu überbrücken. In der sonstigen Industrie erfolgt zudem ein Einsatz von Biomasse in begrenztem Umfang.

Im *FZJ*-Szenario spielt torrefizierte Anbaubiomasse (Biokohle) aus Kurzumtriebsanlagen eine zentrale Rolle für die Bereitstellung von Prozessdampf. Eine starke Nutzung von Biokohle, um Hochtemperaturprozesswärme für Industrieprozesse bereit zu stellen, bietet (in Kombination mit CCS) vor allem im Hinblick auf die zukünftige Notwendigkeit von Negativemissionen ein großes Potenzial.

Prinzipiell werden in beiden Szenarien jeweils mehrere verschiedene Technologien und Energieträger für die Dampfbereitstellung genutzt, wobei gegenüber heute v.a. der Einsatz von Biomasse sowie strombasierte Technologien eine (deutlich) größere Rolle einnehmen. Wasserstoff spielt eine vergleichsweise kleinere Rolle. Einige der zwischen den Szenarien zu beobachtenden Unterschiede lassen sich auf abweichende methodische Ansätze zurückführen. Im *FZJ*-Modell gibt es keine Unterscheidung zwischen Hochtemperatur-Dampf und anderer möglicher Wärmeträger, so dass für den Vergleich stattdessen auf den gesamten Hochtemperaturbedarf (>100 °C) zurückgegriffen wurde. Die Vergleichbarkeit ist dementsprechend in diesem Bereich eingeschränkt.

Diskussion und Fazit

Die Gegenüberstellung der obigen Szenarioergebnisse auf Ebene einzelner Wärmebedarfe offenbart einige Gemeinsamkeiten, jedoch auch Unterschiede. Während die Ge-

meinsamkeiten auf Richtungssicherheit bei der anstehenden Transformation der Industrie hindeuten, erfordern die Unterschiede weitergehende Analysen der zugrunde liegenden methodischen Aspekte und Annahmen oder machen Abhängigkeiten der industriellen Transformationspfade von unsicheren Rahmenbedingungen deutlich.

Einige der zu beobachtenden Unterschiede lassen sich auf abweichende methodische Ansätze zurückführen. Zu nennen ist die zwischen den genutzten Modellen abweichende Differenzierung von Wärmemedien und Temperaturniveaus, die z.B. nur im *WI*-Szenario den Einsatz von (Hochtemperatur-) Wärmepumpen für die Dampfbereitstellung im Bereich <200 °C ermöglicht. Ein weiteres Beispiel ist der Einsatz von H² für den weit überwiegenden Anteil des thermischen Energiebedarfs der Zementindustrie im *FZJ*-Szenario aus Sicht des „allwissenden Planers“ (s. Diskussion zur Gesamtsystemoptimierung oben).

Wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der beiden Szenariostudien haben auch die Annahmen über die Rahmenbedingungen der Industrietransformation. Dies umfasst

- Annahmen zur grundsätzlichen Verfügbarkeit und zu den Kosten von Wasserstoff und dessen Derivaten am Weltmarkt und in Deutschland;
- Annahmen zur Verfügbarkeit von Infrastrukturen für H₂ und CO₂ an Standorten der verschiedenen Branchen. Während das *WI*-Szenario sowohl bei H₂ als auch bei CO₂ von einer vergleichsweise schlanken Infrastruktur ausgeht, sieht das *FZJ*-Szenario eine stärker in die Fläche verzweigte Infrastruktur vor, insbesondere für H₂.

In den hier diskutierten Szenarien werden erneuerbare Wärmequellen in Form von nicht konzentrierender Solarthermie und oberflächennaher Geothermie genutzt, jedoch lediglich für Raumwärme bzw. Niedertemperaturwärme (< 100°C). Das 4-Stufenmodell von IN4climate.NRW, das von Dietmar Schüwer und Georg Holtz im Anschluss an diesen Artikel in dieser „et“ vorgestellt wird, zeigt mit der konzentrierenden Solarthermie und der Tiefengeothermie zwei weitere potenzielle treibhausgasneutrale Wärmequellen auf. Diese

könnten zukünftig auch für Prozesswärme bis ca. 160°C (Geothermie) bzw. 300°C (Concentrated Solar Thermal) eine gewisse Rolle spielen. Die individuelle Eignung und Wirtschaftlichkeit dieser Technologien hängt allerdings stark von lokalen Gegebenheiten wie Flächenverfügbarkeit und geothermischer Ergiebigkeit sowie von unternehmensspezifischen Lastprofilen und weiteren Parametern ab. Hier wird zu prüfen sein, ob die genutzten Modelle für die Erstellung weiterer Szenarien an einen sich kontinuierlich verändernden Forschungsstand angepasst werden und innovative Anwendungen für die Prozesswärmebereitstellung stärker berücksichtigt werden sollten.

Beide Szenarien weisen für die Transformation der Stahlindustrie in dieselbe Richtung, die auch in Übereinstimmung mit den aktuellen Bestrebungen der Branche und der Politik stehen. Beide Szenarien sehen zudem eine gegenüber heute stärkere Rolle für die Elektrifizierung der Prozesswärme, z.B. in der Glasindustrie und beim Prozessdampf. Biomasse in Kombination mit CCS zur Erzeugung negativer Emissionen (BECCS) spielt ebenfalls in beiden Szenarien eine wichtige Rolle. Während diese Strategie im *FZJ*-Szenario in der Breite der Industrie verfolgt wird, konzentriert sich das *WI*-Szenario aufgrund der angenommenen kleiner dimensionierten CO₂-Infrastruktur auf die mineralische Industrie sowie die Walzwerke der Stahlindustrie (letztere sind oben nicht dargestellt). Beide Szenarien gehen dabei von einer gegenüber heute erhöhten Verfügbarkeit von Biomasse für die thermische Nutzung in der Industrie aus, deren Bereitstellung im Einklang mit Nahrungsmittelproduktion und Naturschutz erfolgt. Wasserstoff wird in beiden Szenarien fast ausschließlich an ausgewählten Standorten der energieintensiven Industrie genutzt und spielt für die Prozesswärmebereitstellung in der Fläche (nahezu) keine Rolle.

G. Holtz, C. Schneider und D. Schüwer, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; Wuppertal; F. Kullmann, J. Linßen und D. Stolten, Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung, Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3)

Kontakt: georg.holtz@wupperinst.org