

S1|22

Sonder-
ausgabe 1
März 2022



e|m|w

Das ener|gate-Magazin.

Sonderausgabe

Dekarbonisierung in der Industrie

Wege zu einer
klimaneutralen Industrie

Von **Sascha Samadi**, Senior Researcher, und **Stefan Lechtenböhmer**, Leiter
der Abteilung „Zukünftige Energie-und Industriesysteme“, Wuppertal Institut

Wege zu einer klimaneutralen Industrie

Das Ziel der Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 stellt nicht zuletzt den Industriesektor vor erhebliche Herausforderungen. Für diesen Sektor werden teilweise sehr unterschiedliche Entwicklungspfade in Richtung Klimaneutralität beschrieben, wie ein Blick in verschiedene aktuelle Szenariostudien zeigt. Dennoch gibt es auch im Industriesektor bestimmte Emissionsminderungsstrategien, die in allen vorliegenden Szenarien als unverzichtbar angesehen werden.

✎ Von **Sascha Samadi**, Senior Researcher, und **Stefan Lechtenböhmer**, Leiter der Abteilung „Zukünftige Energie- und Industriesysteme“, Wuppertal Institut

In dem Mitte 2021 vom Deutschen Bundestag verabschiedeten novellierten Klimaschutzgesetz ist festgelegt, dass Deutschland bis 2045 klimaneutral sein soll. Dieses Ziel stellt eine große Herausforderung für alle treibhausgasemittierenden Sektoren dar. Für den Industriesektor sind die Herausforderungen unter anderem deshalb besonders groß, weil in der emissionsintensiven Grundstoffindustrie wesent-

liche Produktionsanlagen typischerweise Lebenszeiten von mehreren Jahrzehnten aufweisen. Das heißt, dass alle Neuinvestitionen in größere Anlagen bereits heute entweder treibhausgasneutral oder zumindest entsprechend umrüstbar sein sollten. Zudem erfordert eine mit Klimaneutralität in Einklang stehende Emissionsreduktion im Industriesektor nach derzeitigem Kenntnisstand einen bedeutenden Neu- und Ausbau von

01 Übersicht über die in diesem Artikel berücksichtigten Studien und Szenarien

	Klimaneutrales Deutschland 2045 (Prognos et al. 2021)	Langfristszenarien (Consentec et al. 2021)	dena-Leitstudie – Aufbruch Klimaneutralität (EWI 2021)	Klimapfade 2.0 (BDI/BCG 2021)
Erscheinungsdatum	April 2021	Mai 2021	Oktober 2021	Oktober 2021
Auftraggeber	Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, Stiftung Klimaneutralität	Bundeswirtschaftsministerium	Deutsche Energie-Agentur (dena)	Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI)
Bearbeitung durch	Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut	Consentec, Fraunhofer ISI, Ifeu, TU Berlin	Energiewirtschaftliches Institut (EWI)	Boston Consulting Group (BCG)
Im vorliegenden Artikel berücksichtigte Klimaschutzszenarien	KN2045	TN-Strom TN-H2	KN100	Zielpfad
Treibhausgasneutralität wird erreicht bis	2045	2050	2045	2045

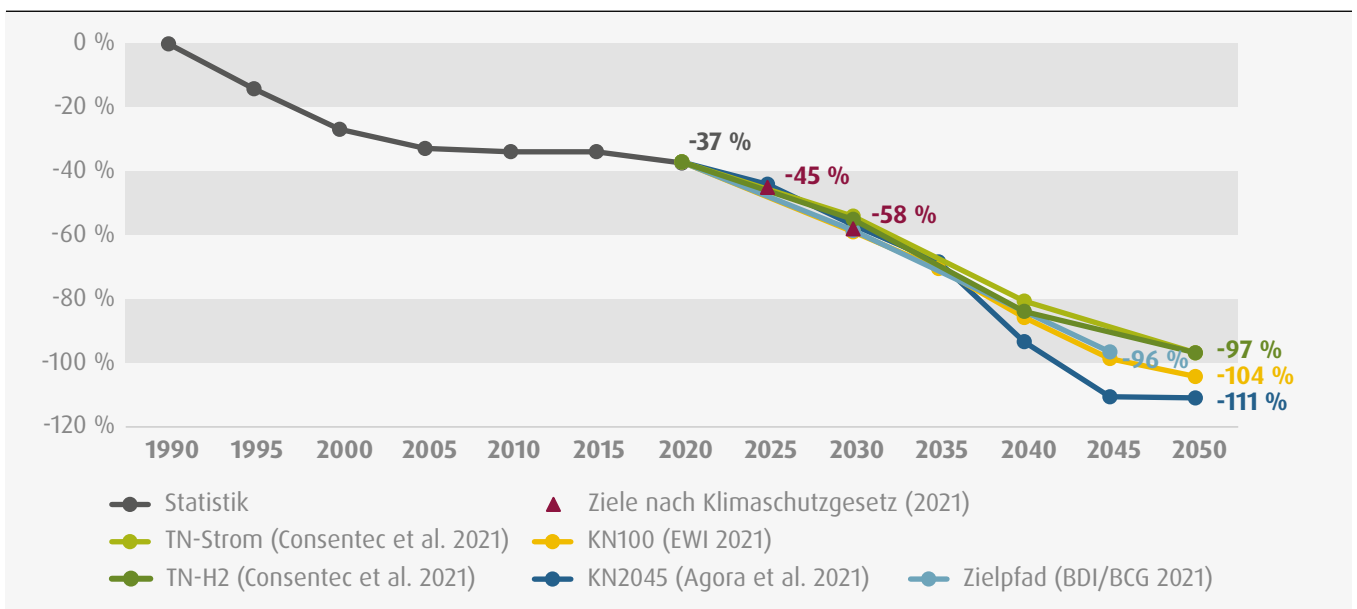
Infrastrukturen wie Stromnetzen, Wasserstoff- und CO₂-Pipelines. Diese sind mit langjährigen Planungs-, Genehmigungs- und Bauzeiten verbunden.

Aus diesen Gründen ist es wichtig, dass Industrie und Politik eine gemeinsame Vorstellung entwickeln, wie die Transformation des Industriesektors in Richtung Klimaneutralität in etwa aussehen wird. Eine solche gemeinsame Vorstellung erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass die Politik auf den verschiedenen Ebenen zeitnah zielgerichtete energie- und industriepolitische Rahmenbedingungen schafft und Unternehmen rechtzeitig Investitionen in neue, klimaneutral betreibbare Anlagen tätigen.

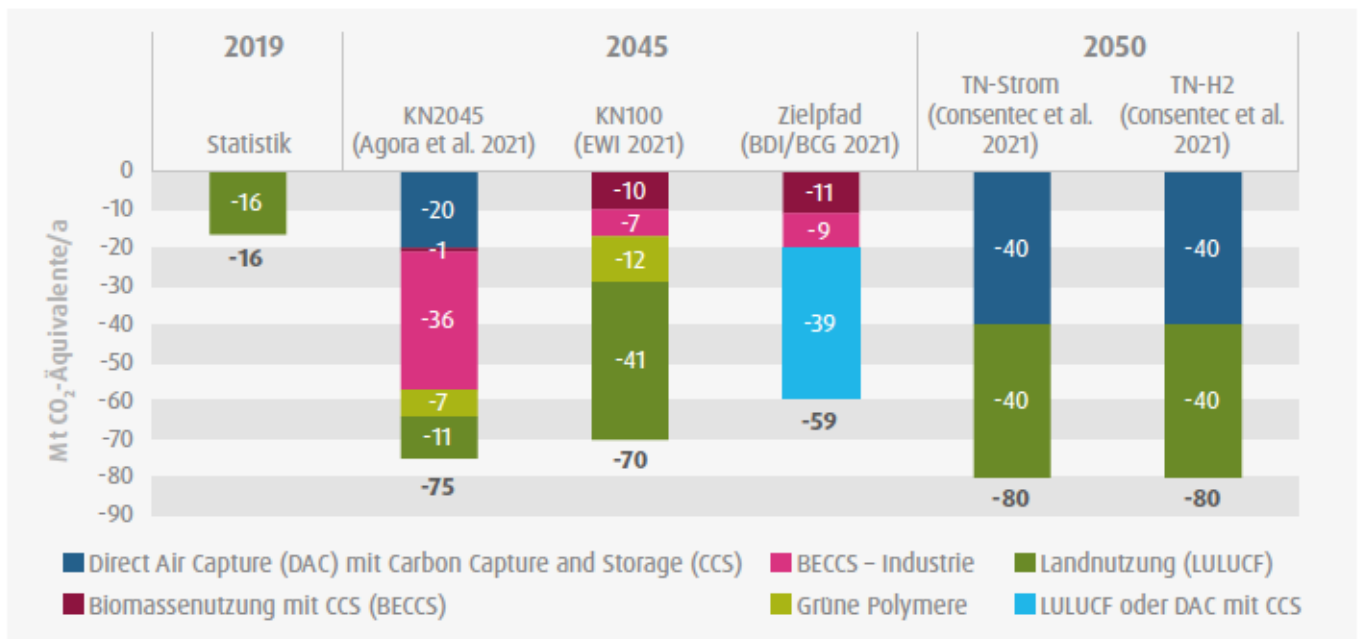
Szenarien als Orientierung für die Transformation

Im Laufe des Jahres 2021 sind mehrere Szenariostudien veröffentlicht worden, die detailliert für die verschiedenen treibhausgasemittierenden Sektoren in Deutschland aufzeigen, wie Entwicklungspfade in Richtung Klimaneutralität aussehen könnten. In dem vorliegenden Artikel werden fünf Szenarien aus vier großen Studien verschiedener Auftraggeber hinsichtlich ihrer Vorstellungen zur Transformation des Industriesektors näher betrachtet und miteinander verglichen. Tabelle 1 bietet einen Überblick über diese vier Studien und die ausgewählten Szenarien. Ein wesentliches Kriterium bei der Auswahl der Szenarien war dabei neben ihrer Aktualität eine ausreichende Detailtiefe bei der Beschreibung der Entwicklungen im Industriesektor.

01 Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Industriesektors in den betrachteten Szenarien



02 Negative Emissionen nach Quellen in den betrachteten Szenarien in den Jahren 2045 beziehungsweise 2050



Der Vergleich der Szenarien soll aufzeigen, welche Strategien für die Transformation des Industriesektors gegenwärtig allgemein als vielversprechend eingeschätzt werden – und damit als relativ „robust“ gelten können. Gleichzeitig wird auch aufgezeigt, welche Strategien derzeit noch sehr unterschiedlich bewertet werden.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Industriesektors in den fünf betrachteten Szenarien bis zum Jahr 2050. Die Emissionsminderungen verlaufen in den Szenarien bis 2030 ähnlich und betragen dann gegenüber 1990 zwischen 54 Prozent und 59 Prozent. Nach 2035 unterscheidet sich die Entwicklung der Treibhausgasemissionen jedoch stärker zwischen den Szenarien, wobei das Szenario KN2045 deutlich niedrigere Emissionen als die anderen Szenarien beschreibt.

Im Szenario KN2045 wird die Notwendigkeit gesehen, bis 2045 negative Nettoemissionen im Industriesektor zu realisieren, um insbesondere die teilweise als nicht vermeidbar eingeschätzten Emissionen der Landwirtschaft zu kompensieren. Auch die anderen betrachteten Szenarien sehen bis 2045 beziehungsweise 2050 grundsätzlich einen Bedarf an negativen Emissionen in Höhe von jährlich etwa 60 bis 80 Megatonnen CO₂-Äquivalenten (Abb. 2). Sie gehen aber davon aus, dass die negativen Emissionen in wesentlich geringerem Umfang (KN100, Zielpfad) beziehungsweise gar nicht (TN-Strom, TN-H2) von der Industrie erbracht werden.

Die Notwendigkeit signifikanter negativer Emissionen aus dem Industriesektor wird im Szenario KN2045 mit hohen Unsicherheiten in Bezug auf die zukünftigen Beiträge natürlicher Senken in der Landnutzung (im so genannten LULUCF-Sektor) sowie mit dem Verweis auf vergleichsweise niedrige Kosten

für die Nutzung von Biomasse in Kombination mit Carbon Capture and Storage (CCS) in großen Industrieanlagen begründet.

In den beiden untersuchten TN-Szenarien hingegen führen relativ optimistische Annahmen zu negativen Emissionen aus dem LULUCF-Sektor sowie hohe zukünftige Beiträge durch „negative technische Emissionen“ dazu, dass in diesen Szenarien im Jahr 2050 immer noch gewisse Netto-Restemissionen aus der Industrie akzeptiert werden (Abb. 1). An dieser Stelle wird angenommen, dass die negativen technischen Emissionen in den beiden TN-Szenarien durch die Abscheidung von CO₂ aus der Luft und anschließende geologische Speicherung („Direct Air Capture“, DAC) realisiert werden.

Vergleich der zentralen Emissionsminderungsstrategien im Industriesektor

Tabelle 2 gibt einen Überblick über das Ausmaß, in dem in den betrachteten Szenarien jeweils auf verschiedene zentrale Strategien zur Minderung der Treibhausgasemissionen des Industriesektors gesetzt wird. Sie verdeutlicht, dass es im Industriesektor zwischen den Szenarien teilweise erhebliche Unterschiede bezüglich der angenommenen Emissionsminderungsstrategien gibt. Im Vergleich zur Energiewirtschaft, dem Verkehr und dem Gebäudesektor scheinen im Industriesektor die Unsicherheiten bezüglich der vielversprechendsten Minderungsstrategien am größten zu sein.

In allen betrachteten Szenarien wächst bis Mitte des Jahrhunderts die relative Bedeutung und auch der absolute Beitrag von Strom im industriellen Endenergieverbrauch (vgl. Abb. 3, S. 12). So steigt bis Mitte des Jahrhunderts der Strombedarf im Industriesektor von knapp 220 Terawattstunden im Jahr 2019 auf etwa 310 bis 320 Terawattstunden in den Szenarien KN2045 und KN100 und sogar auf rund 400 Terawattstunden in den Szenarien Zielpfad und TN-Strom.

Auch klimaneutral hergestellter Wasserstoff, der spätestens im Jahr 2050 ausschließlich in der Form von „grünem“ (also auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellten) Wasserstoff bereitgestellt wird, wird in allen Szenarien zu einem relevanten Energieträger in der Industrie. Der jährliche Bedarf an Wasserstoff (inkl. des nicht-energetischen Bedarfs) liegt Mitte des Jahrhunderts im Industriesektor in den Szenarien bei mindestens 74 Terawattstunden (KN2045) und bei bis zu 359 Terawattstunden (TN-H2). In allen Szenarien wird der größte Teil des im Industriesektor verwendeten Wasserstoffs in der Stahl- und Chemieindustrie verwendet, sowohl für energetische als auch für nicht-energetische Zwecke. Eine bemerkenswerte Gemeinsamkeit der hier betrachteten Szenarien ist außerdem, dass sie alle bis spätestens 2050 eine vollständige Umstellung der Primärstahlproduktion von der kohlebasierten Hochofen-Route auf die wasserstoffbasierte Direktreduktions-Route annehmen.

Die Szenarien unterscheiden sich allerdings darin, wie viel Wasserstoff für die Bereitstellung von Prozesswärme in anderen Branchen der Industrie verwendet wird. Ein Ausreißer in dieser Hinsicht ist die sehr starke Nutzung von Wasserstoff in verschiedenen Branchen der Industrie im Szenario TN-H2. In Einklang mit dem Wasserstoff-Schwerpunkt dieses Szenarios wird dort ein Großteil der benötigten Prozesswärme durch Wasserstoff bereitgestellt, während die anderen Szenarien in deutlich stärkerem Maße auf Strom oder Biomasse zur Bereitstellung von Prozesswärme setzen.

Synthetische Energieträger, die auf grünem Wasserstoff und damit letztlich auf Strom aus erneuerbaren Energien beruhen, werden in den Szenarien im Industriesektor vor allem stofflich in der chemischen Industrie in Form synthetischer Kohlenwasserstoffe genutzt, um Plattform-Chemikalien („high-value chemicals“, HVC) herzustellen. So wird in der HVC-Produktion in allen betrachteten Szenarien der Einsatz fossiler Rohstoffe bis Mitte des Jahrhunderts vollständig beendet und in erster Linie durch den Einsatz der synthetischen Kohlenwasserstoffe (synthetisches Naphtha und Methanol) ersetzt. Diese werden auf Grundlage von grünem Wasserstoff und biogenem oder aus der Atmosphäre entnommenem Kohlenstoff hergestellt und in den Szenarien überwiegend importiert. Im Szenario KN2045 wird zudem im Vergleich zu den anderen Szenarien bis 2045 in bedeutendem Maße ein chemisches Recycling von Kunststoffabfällen unterstellt, aus denen Methanol und Pyrolyseöl als Rohstoffe für die HVC-Produktion gewonnen werden.

Biomasse im Industriesektor wird am stärksten im Szenario KN2045 eingesetzt. Dort werden 2045 rund 170 Terawattstunden Biomasse eingesetzt, gegenüber etwa 30 Terawattstunden im Jahr 2019. Dies ist vor allem auf die bereits erwähnte Strategie zurückzuführen, negative Emissionen durch den Einsatz von Biomasse in Kombination mit CCS („Bioenergy with carbon capture and storage“, BECCS) zu erreichen, vor allem in Großanlagen der Chemie- und Stahlindustrie. Auch in den Szenarien KN100 und Zielpfad wird Biomasse stärker als heu-

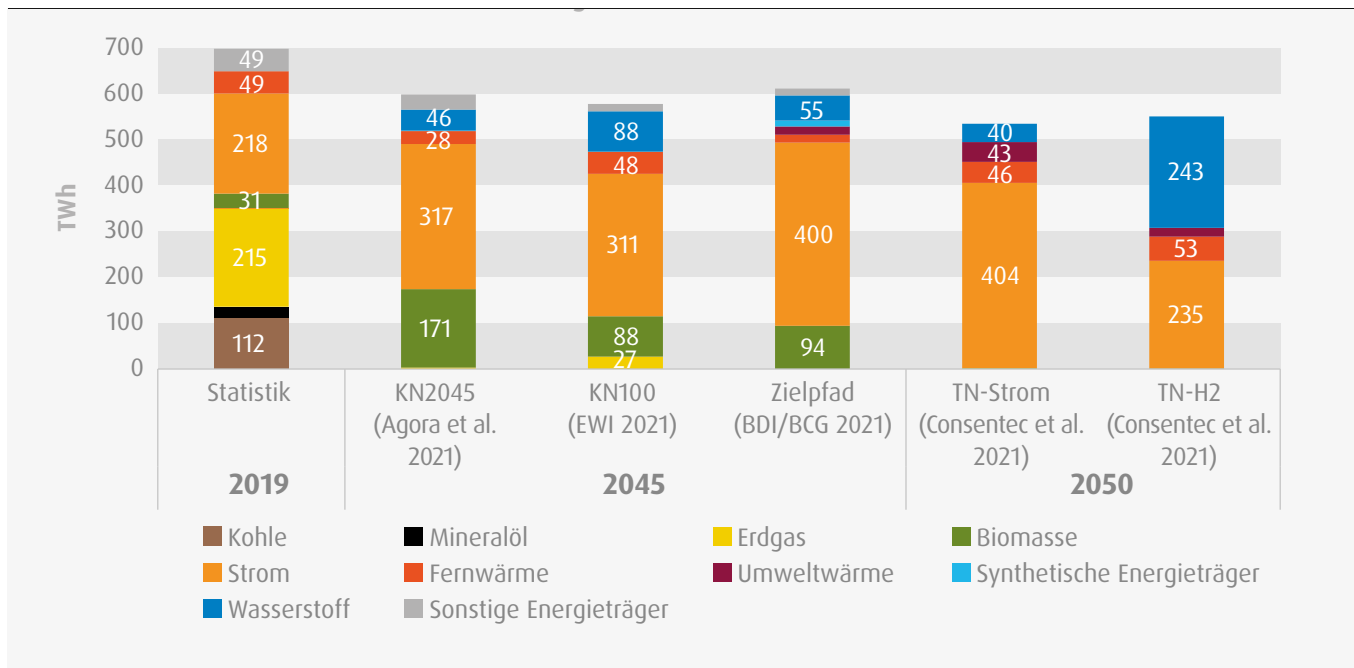
02 Überblick über die zentralen Emissionsreduktionsstrategien im Industriesektor in den Szenarien

	KN2045 (Prognos et al. 2021)	KN100 (EWI 2021)	Zielpfad (BDI/BCG 2021)	TN-Strom (Consentec et al. 2021)	TN-H2 (Consentec et al. 2021)
Einsatz von Strom (Direktelektrifizierung)	++	++	+++	+++	+
Einsatz von Wasserstoff*	+	++	+	++	+++
Einsatz synthetischer Energieträger*	+	+	++	k. A.	k. A.
Nutzung von Biomasse	+++	++	++	0	0
CCS-Einsatz für fossiles CO₂	++	+	++	0	0
CCS-Einsatz für biogenes CO₂ (BECCS)	+++	+	+	0	0
Steigerung der Energieeffizienz	++	++	++	++	++
Steigerung der Materialeffizienz	+	+	0	+++	+++
Erhöhung von Recyclingraten	++	+	+	+++	+++
Materialsubstitution	+	0	+	+	+
Reduktion der Nachfrage im Endverbrauch	0	0	0	0	0

*Betrachtet werden hier sowohl der energetische als auch der nicht-energetische Verbrauch.

Legende: 0 keine oder kaum Nutzung der Strategie, + moderate Nutzung der Strategie, ++ mittlere bis starke Nutzung der Strategie, +++ sehr starke Nutzung der Strategie

03 Industrieller Endenergiebedarf nach Energieträgern in den betrachteten Szenarien in den Jahren 2045 beziehungsweise 2050



te im Industriesektor eingesetzt und auch in diesen Szenarien werden negative Emissionen über Biomasse-CCS generiert – allerdings in geringerem Umfang als in KN2045. Die Biomasse wird in diesen Szenarien zudem auch ohne CCS-Einsatz für die Bereitstellung von Prozesswärme in verschiedenen Branchen der Industrie genutzt.

Der Verzicht auf eine CO₂-Speicherung von Industrieemissionen in den beiden betrachteten TN-Szenarien wird dort vor allem durch optimistischere Annahmen zu künftigen negativen Emissionen im LULUCF-Sektor und durch andere nicht genauer ausgeführte „negative technische Emissionen“ kompensiert.

» Künftige Verbesserungen der Energieeffizienz spielen in allen Szenarien eine wichtige Rolle.

Künftige Verbesserungen der Energieeffizienz spielen offensichtlich in allen Szenarien eine wichtige Rolle. Die Endenergieintensität, definiert als Endenergiebedarf der Industrie pro industrieller Bruttowertschöpfung, verbessert sich in allen untersuchten Szenarien in ähnlichem Umfang (durchschnittlich um 1,6 bis 1,7 Prozent pro Jahr) und liegt leicht über der durchschnittlichen jährlichen Veränderungsrate, die zwischen 2000 und 2019 beobachtet werden konnte (1,5 %).

In den beiden TN-Szenarien werden für verschiedene Grundstoffe Verbesserungen der Materialeffizienz und damit verbundene Nachfragerückgänge von meist 5 bis 15 Prozent angenommen. In den anderen drei Szenarien finden sich dagegen Annahmen zur Verbesserung der Materialeffizienz als explizite Strategie zur Verringerung der Emissionen im Industriesektor ausschließlich in Bezug auf Zement. Ebenso spielen Steigerungen der Recyclingraten vor allem in den TN-Sze-

narien eine wichtige Rolle. So wird in diesen beispielsweise angenommen, dass der Anteil der Sekundärstahlerzeugung in Elektrostahlwerken von gegenwärtig rund 30 Prozent bis 2050 auf 60 Prozent steigen kann. Die anderen Szenarien sehen ebenfalls einen Anstieg vor, dieser fällt aber weniger ausgeprägt aus. Das Szenario KN2045 ist hingegen hinsichtlich des zukünftigen Anteils des chemischen Recyclings am optimistischsten und geht von einer klaren Priorisierung des chemischen Recyclings gegenüber einer thermischen Verwertung aus. Im Szenario wird somit derjenige Anteil von Kunststoffen, der nicht mechanisch recycelt werden kann, weitgehend über verschiedene Verfahren des chemischen Recyclings wiederverwertet.

Die Substitution bestimmter Materialien durch weniger energie- und emissionsintensive Alternativen wird in keinem der untersuchten Szenarien als eine bedeutende Strategie zur Verringerung der Treibhausgasemissionen des Industriesektors angenommen. Die beiden TN-Szenarien erwähnen die Materialsubstitution aber als Strategie, um eine gewisse Minderung der künftigen Stahlnachfrage im Vergleich zu einer Referenzentwicklung zu erreichen, während in den Szenarien Zielpfad und KN2045 davon ausgegangen wird, dass die künftige Zementnachfrage in begrenztem Umfang durch die Substitution von Zement (z. B. durch Holz) verringert werden kann.

Keines der Szenarien geht von einer künftigen Verringerung der Nachfrage im Endverbrauch aus, zum Beispiel einer geringeren Nachfrage nach Konsumgütern, um infolge eines reduzierten Grundstoffbedarfs die Emissionen des Industriesektors im Vergleich zu einer Referenzentwicklung zu mindern.

Wesentliche Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Im Folgenden werden wesentliche Erkenntnisse hinsichtlich der Gemeinsamkeiten und Unterschiede der betrachteten Szenarien zur Transformation des Industriesektors in Richtung Klimaneutralität zusammengefasst.

Gemeinsamkeiten

- Es ist technisch möglich, im Industriesektor bis Mitte des Jahrhunderts Netto-Emissionsminderungen von mindestens 97 Prozent (im Vergleich zu 1990) zu erreichen.
- Die Stromnachfrage des Industriesektors wird als Summe der direkten und indirekten Nutzung von Strom (in Form von Wasserstoff und synthetischen Kohlenwasserstoffen) erheblich ansteigen.
- Die Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff wird voraussichtlich notwendig sein, um Klimaneutralität zu erreichen. Dies kann an Industrieanlagen (Vorteil einer höheren CO₂-Konzentration), über Luftabscheidung oder auf beiden Wegen erfolgen.
- In allen Szenarien wird von weiteren Verbesserungen bei der Energieeffizienz und von höheren (wenn auch unterschiedlich hohen) Recyclingraten ausgegangen.
- Alle betrachteten Szenarien erwarten, dass die primäre Stahlerzeugung vollständig auf die wasserstoffbasierte Direktreduktionsroute umgestellt wird.

Unterschiede

- Die Szenarien weisen erhebliche Unterschiede hinsichtlich der relativen Bedeutung von Strom, Wasserstoff und Biomasse im Endenergiebedarf der Industrie in einem klimaneutralen System auf. Dies spiegelt die weitgehende Flexibilität der Industrie bei der Nutzung verschiedener Energiequellen für die Prozesswärmeerzeugung wider.
- Die Szenarien kommen hinsichtlich der Frage, ob und falls ja in welchem Maße Biomasse-CCS im Industriesektor zukünftig eine Rolle spielen sollte, zu unterschiedlichen Antworten.
- Es gibt sehr unterschiedliche Einschätzungen, wie stark die Recyclingraten in Zukunft erhöht werden können und ob chemisches Recycling einen wesentlichen Beitrag zur Emissionsreduktion leisten wird.

- Schließlich werden Strategien der Nachfrageminderung und Materialsubstitution in den Szenariostudien nicht oder zumindest nicht im Detail analysiert. Dieser Punkt deutet vermutlich weniger auf Gegensätze zwischen den Studien als auf eine generelle Unsicherheit über die Relevanz dieser Strategien und damit auf weiteren Forschungsbedarf hin.

Fazit

Einige Strategien zur Dekarbonisierung der Industrie spielen in allen betrachteten Szenarien eine wichtige Rolle. Auf der anderen Seite gibt es einzelne Strategien, deren jeweilige Bedeutung noch sehr unterschiedlich eingeschätzt wird. Die identifizierten Gemeinsamkeiten bei zentralen Strategien können und sollten Anhaltspunkte für die Politik darstellen, in welche Richtung politische Maßnahmen sowie energie- und industriepolitische Rahmenbedingungen in den kommenden Jahren wirken müssen, um der Industrie eine rechtzeitige Transformation in Richtung Klimaneutralität zu ermöglichen. So ist offensichtlich, dass die Industrie zur Zielerreichung einen erheblichen zusätzlichen Bedarf an Strom aus erneuerbaren Energien haben wird und dass zudem mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit der Aufbau einer Wasserstoff- und CO₂-Pipeline-Infrastruktur notwendig sein wird. Die identifizierten Unterschiede in den Szenarien deuten hingegen auf weiteren wissenschaftlichen Forschungsbedarf hin, um sowohl das Potenzial als auch die Umsetzbarkeit einiger Strategien – wie Biomasse-CCS-Einsatz, deutlich höhere Recyclingraten und nachfrageseitige Maßnahmen – besser einschätzen zu können. ◀

Hinweis: Dieser Artikel wurde im Rahmen des Projekts SCI4climate.NRW verfasst, das vom Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert wird.



SASCHA SAMADI

Jahrgang 1981

- Studium der Wirtschaftswissenschaften
- seit 2010 Wuppertal Institut, Abteilung „Zukünftige Energie- und Industriesysteme“
- ✉ sascha.samadi@wupperinst.org



STEFAN LECHTENBÖHRER

Jahrgang 1965

- Studium der Geographie und Wirtschaftswissenschaften
- seit 1995 Wuppertal Institut, Abteilung „Zukünftige Energie- und Industriesysteme“
- ✉ stefan.lechtenboehmer@wupperinst.org

e|m|w

Das ener|gate-Magazin.

energate gmbh

Norbertstraße 3-5

D-45131 Essen

Tel.: +49 (0) 201.1022.500

Fax: +49 (0) 201.1022.555

www.energate.de

Werden Sie Mitglied im **ener|gate club**
und erhalten Sie neben der **e|m|w**
viele weitere exklusive Leistungen!

www.energate.club

