

tu

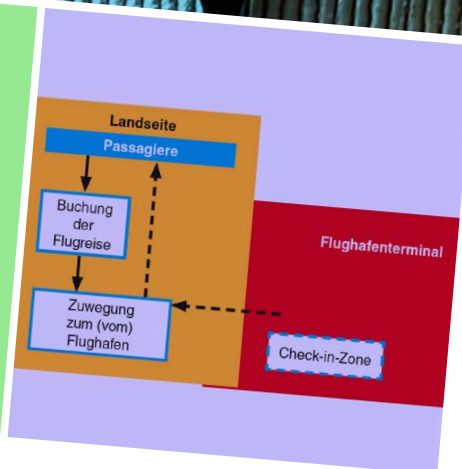
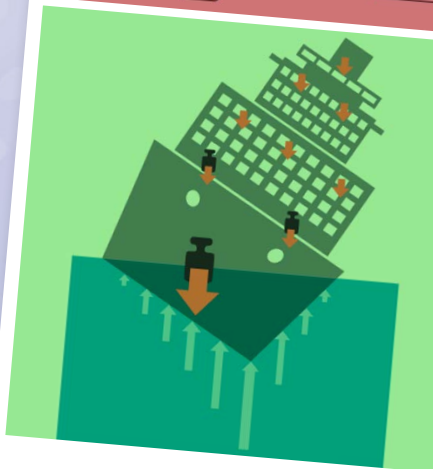
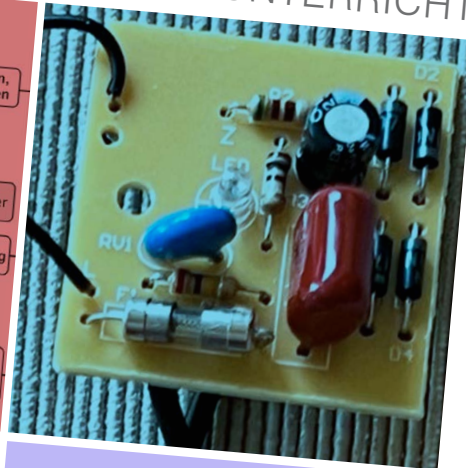
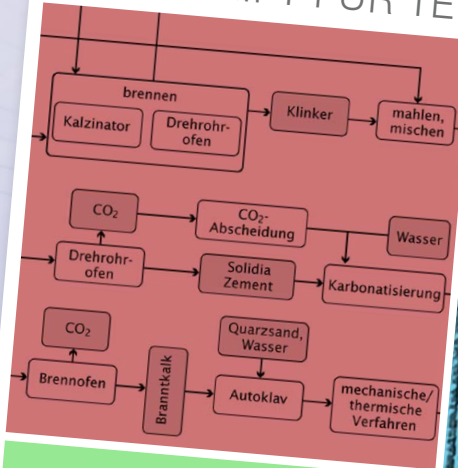
195

E 3915

Neckar-Verlag

1. Quartal 2025

ZEITSCHRIFT FÜR TECHNIK IM UNTERRICHT



ISSN 0342-6254

mit freundlicher Genehmigung
der Fachzeitschrift

tu

ZEITSCHRIFT
FÜR TECHNIK
IM UNTERRICHT

NV
Neckar-Verlag

Neckar-Verlag GmbH
Klosterring 1
78050 Villingen-Schwenningen
www.neckar-verlag.de

Informationen für den Technikunterricht



Die Technikfolgenabschätzung (TA) trägt dazu bei, die Potenziale des wissenschaftlich-technischen Wandels zu nutzen und Risiken minimieren oder vermeiden zu können. In dieser Rubrik greifen wir regelmäßig aktuelle Publikationen des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) auf, die wir der Leserschaft der **tu** als Themen für den Technikunterricht in besonderem Maße empfehlen. Mehr zum TAB und zum Download aller hier zusammengefassten Studien auf www.tab-beim-bundestag.de.



Alternative Technologiepfade für die Emissionsreduktion in der Grundstoffindustrie

Claudio Caviezel, Matthias Achternbosch, Reinhard Grünwald¹⁾

Deutschland soll bis 2045 klimaneutral werden. Das bedeutet, dass auch die Industrie, die 2020 für 176 Mio. t CO_{2-eq}²⁾ bzw. 24 % der deutschen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) verantwortlich war, bis 2045 netto keine THG mehr ausstoßen darf. Soll in Deutschland weiterhin in ähnlich hoher Menge wie heute produziert werden, sind innerhalb der nächsten 20 Jahre die auf fossilen Ressourcen basierenden Produktionsprozesse auf emissionsarme Verfahren und Rohstoffe umzustellen. Die Transformation ist für die Industrieunternehmen, die häufig in scharfem internationalem Wettbewerb stehen, mit hohen Risiken verbunden.

Die Grundstoffindustrie gehört zu den bedeutenden Emittenten: Die Eisen- und Stahlproduktion stieß 2020 46 Mio. t CO_{2-eq} aus, die Zementherstellung 20 Mio. t und die Produktion von organisch-chemischen Grundchemikalien (High-Value Chemicals – HVC) 8 Mio. t. Addiert waren das über 40 % der industriellen THG-Emissionen.

Den Ausgangspunkt für die Transformation der Grundstoffindustrien bilden die heutigen Produktionsstätten. Die hier angewandten, überwiegend auf fossilen Ressourcen basierenden Produktionsverfahren müssen auf neue, klimafreundliche Herstellungsprozesse umgestellt werden.

Eisen- und Stahlerzeugung

Die derzeit 16 deutschen Hochöfen produzieren im Mittel 30 Mio. t Rohstahl pro Jahr. Hinzu kommen noch ca. 1 Mio. t Rohstahl aus dem Direktreduktionsverfahren sowie ca. 12 Mio. t an Sekundärstahl durch Einschmelzen von Eisen- und Stahlschrott

Konventionelle Produktionsverfahren

In konventionellen **Hochöfen** wird Eisenerz unter Einsatz von Kohle zu Roheisen reduziert. Das dabei gebildete CO₂ ist für den Löwenanteil der THG-Emissionen der Stahlherstellung

verantwortlich. Das flüssige Roheisen wird im Konverter zu Stahl weiterverarbeitet. Dazu wird Sauerstoff eingeblasen, um den Kohlenstoffgehalt einzustellen und Verunreinigungen zu entfernen. Durch Zusatz weiterer Stoffe, wie Mangan oder Nickel, werden die Eigenschaften des Stahls bestimmt. Heute sind über tausend verschiedene Stahlsorten normiert.

Beim methanbasierten **Direktreduktionsverfahren** wird Erdgas anstelle von Kohle als Reduktionsmittel verwendet. Dadurch lässt sich der Brennstoffbedarf und damit der CO₂-Ausstoß pro Tonne Roheisen reduzieren. Es entsteht ein fester Eisenschwamm, der für die Weiterverarbeitung eingeschmolzen werden muss.

In der Sekundärstahlproduktion wird Eisen- und Stahlschrott in einem **Elektrolichtbogenofen** aufgeschmolzen. Der Energiebedarf wird hier in erster Linie durch Strom gedeckt. Kohlenstoff wird als zusätzlicher Energielieferant, Schäumungsmittel und für die Einstellung des Kohlenstoffgehalts im Stahl benötigt.

Vermeidungstechnologien

Besonders drei technische Alternativen sind unter den (aktuellen) Rahmenbedingungen der deutschen Stahlwerke vielversprechend: die wasserstoffbasierte Direktreduktion mit Elektrolichtbogenofen, die wasserstoffbasierte Direktreduktion mit Schmelzofen und

¹⁾ Der vorliegende Beitrag ist eine Kurzfassung der Ergebnisse des gleichnamigen TA-Projekts <https://www.tab-beim-bundestag.de/projekte_alternative-technologiepfade-fur-die-emissionsreduktion-in-der-grundstoffindustrie.php> sowie der zugehörigen TAB-Berichte (Ergebnisbericht: doi:10.5445/IR/1000170905 <<https://doi.org/10.5445/IR/1000170905>>, Langfassung: doi.org/10.5445/IR/1000170906) <<https://doi.org/10.5445/IR/1000170906>>.

²⁾ Bei der CO₂-Äquivalente wird die Erwärmung, die ein Treibhausgas verursacht, in die Menge an CO₂ umgerechnet, die dieselbe Erwärmung bewirken würde.

Konverter sowie die CO₂-Abscheidung beim Hochofen mit Konverter. Die Verfahren werden in der Folge beschrieben. Abbildung 1 stellt die zugehörigen Prozessketten schematisch dar. Die Prozessschritte sind umrandet, (Zwischen-)Produkte grau unterlegt.

H₂-Direktreduktion (H₂-DR) mit Elektrolichtbogenofen (EAF)

In dieser Route wird das Eisenerz im Direktreduktionsofen mithilfe von Wasserstoff (H₂) anstelle von Kohle zu Eisen reduziert, wobei kein CO₂ entsteht. Um ein Zuwachsen des Ofens zu vermeiden, wird das Eisen nicht geschmolzen. Es entsteht fester Eisenschwamm. In einem zweiten Schritt wird der Eisenschwamm im Elektrolichtbogenofen (Electric Arc Furnace – EAF) (s. Abbildung 1) gemeinsam mit Eisen- und Stahlschrott aufgeschmolzen und zu Stahl verarbeitet. Die im Eisenschwamm noch enthaltene Gangart (mitgeführte Minerale und Gesteinsreste) muss im EAF über eine Schlacke abgetrennt werden, was den elektrischen Energiebedarf erhöht. Daher werden hochwertige, d. h. gangartarme Eisenerze favorisiert, die aber nur in begrenzter Menge und zu höheren Preisen verfügbar sind.

Mitte 2023 wurde in Lingen die weltweit größte reine H₂-DR-Pilotanlage eröffnet. Die industrielle Reife dieser Technik wird noch vor 2030 erwartet. Eine Herausforderung stellen eventuell im Eisenschwamm vorhandene Störstoffe (wie Stickstoff oder Schwefel) dar, die im EAF nicht abgetrennt werden können und daher eine aufwendige Nachbehandlung erfordern. Eine weitere Schwierigkeit ist der gegenüber Konvertern geringere Durchsatz von heute gängigen EAF, wodurch Anpassungen in den nachfolgenden Aggregaten und der Stahlwerkslogistik nötig werden könnten.

Sofern grüner, d. h. aus erneuerbaren Energien hergestellter, Wasserstoff verwendet wird, kann Eisenschwamm nahezu emissionsfrei hergestellt werden. Geringe unvermeidbare CO₂-Emissionen entstehen durch den notwendigen Kohlenstoff im EAF. Wird der EAF mit erneuerbarem Strom

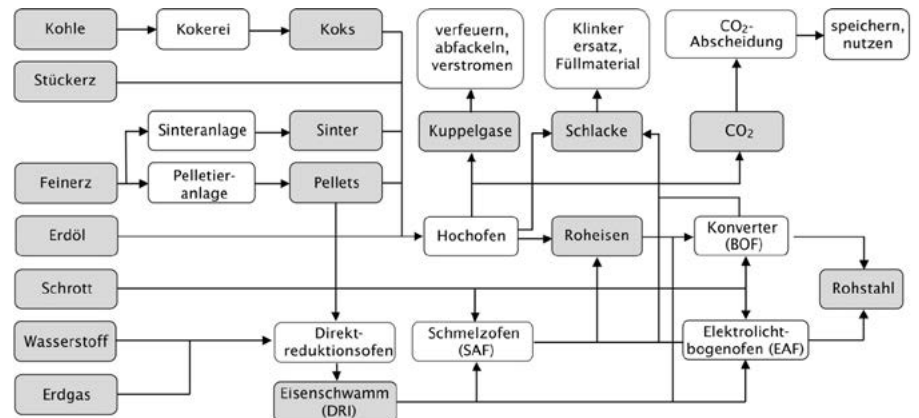


Abb. 1: Ausgewählte alternative Routen der Stahlproduktion mit Prozessschritten und Zwischenprodukten.

betrieben, beträgt das THG-Reduktionspotenzial gegenüber der konventionellen Hochofenroute bis zu 96 %. Die Umstellung ist allerdings mit hohen Kosten verbunden, da komplett neue Anlagen erforderlich sind. Die Investitionskosten pro Tonne Rohstahl übersteigen die Kosten für eine Modernisierung der konventionellen Produktionsstätten um mehr als das Zweifache, bei Eigenerzeugung des benötigten Wasserstoffs mittels Elektrolyse um mehr als das Fünffache. Für die operativen Kosten wird anfangs eine Steigerung von über 50 % gegenüber der konventionellen Stahlproduktion angenommen.

H₂-Direktreduktion mit Schmelzofen (SAF) und Konverter

In dieser Route wird Eisenerz ebenfalls mittels H₂ im DR-Ofen zu Eisenschwamm reduziert. Dieser wird jedoch in einem elektrischen Schmelzofen (Submerged Arc Furnace – SAF) verflüssigt und von der Gangart befreit. Das flüssige Roheisen wird schließlich im konventionellen Konverter zu Stahl weiterverarbeitet. Gegenüber dem Einsatz des EAF hat diese Route eine Reihe von Vorteilen:

- Die Stoffflüsse können auf die Abstichmenge der vormaligen Hochofen abgestimmt werden, sodass vorhandene Konverter und nachfolgende Aggregate weiterhin nutzbar sind.
- Es kann gangartreicherer Eisenschwamm verarbeitet werden, so dass geringere Ansprüche an die

Qualität des Eisenerzes gestellt werden.

- Da die konventionelle Konvertermetallurgie bestehen bleibt, können alle Stahlqualitäten hergestellt werden.

Allerdings betritt das Verfahren zum Teil Neuland, da es zur Herstellung von reinem Roheisen soweit ersichtlich noch nicht im industriellen Maßstab verfügbar ist. Das Verfahren muss angepasst und optimiert werden. Elektrische Schmelzöfen zur Herstellung von reinem Roheisen sind in der Erprobungsphase. Eine Herausforderung dieser Route stellt die Energiezufuhr für den Konverter dar: Da wasserstoffreduzierter Eisenschwamm keinen Kohlenstoff enthält, muss dieser hier zugegeben werden. Wie dies technisch am besten gelingt, wird derzeit in Pilotanlagen erprobt.

Das THG-Einsparpotenzial dieser Route wird, bei Verwendung von grünem Wasserstoff für den DR-Ofen und erneuerbarem Strom für den SAF, gegenüber der konventionellen Hochofenroute auf 95 % geschätzt.

Die Investitionskosten für einen Technologiewechsel übersteigen diejenigen einer Modernisierung der konventionellen Hochofenroute um mehr als das Dreifache, bei Eigenerzeugung des benötigten Wasserstoffs mittels Elektrolyse um mehr als das Sechsfache. Bei den operativen Kosten wird in der Anfangsphase eine Steigerung von über 60 % angenommen.

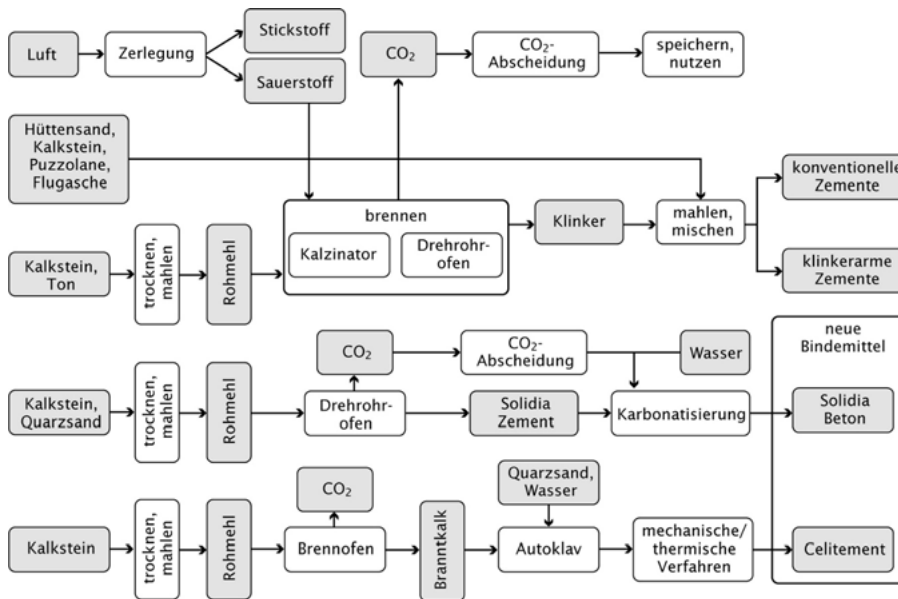


Abb. 2: Routen der Zementproduktion mit Prozessschritten und Zwischenprodukten (vereinfachte Darstellung).

Hochofen mit Konverter und CO₂-Abscheidung

Bei dieser Option wird die konventionelle Hochofenroute um Anlagen für die CO₂-Abscheidung erweitert, an den eigentlichen Prozessen der Eisen- und Stahlerzeugung ändert sich nichts. Idealerweise müsste sich die CO₂-Abscheidung auf alle Komponenten der Stahlerzeugung (u. a. Kokerei, Hochofen, Konverter, Walzwerk, Gichtgaskraftwerk) erstrecken, allerdings limitieren die schieren Ausmaße eines Stahlwerks die praktische Umsetzbarkeit auf den Hochofen. Erwartet wird so eine Abscheidungsrate von ca. 50 % der THG-Emissionen der Hochofenroute. Das abgeschiedene CO₂ kann gespeichert (Carbon Capture and Storage, CCS) oder prinzipiell auch weiterverwendet (Carbon Capture and Usage, CCU) werden.

Noch ist keine CO₂-Abscheidung an einem konventionellen Stahlwerk industriell umgesetzt, erste Demonstrationsprojekte laufen derzeit an. Aus verfahrenstechnischer Sicht ist die Nachrüstung im Vergleich zu anderen Vermeidungsoptionen deutlich einfacher und kostengünstiger umzusetzen. Die Nachrüstung im Rahmen einer Modernisierung würde zu Investitionsmehrkosten von ca. 70 % führen. Die operativen Kosten würden durch den zusätzlichen Strombedarf für die CO₂-Abscheidung nur marginal erhöht.

Zement

In Deutschland produzieren 54 Werke ca. 35,5 Mio. t Zement im Jahr. Davon sind 19 reine Mahlwerke, in denen Zemente aus Klinker und weiteren Zuzugstoffen gemahlen und gemischt werden. Da dort kein Klinker hergestellt wird, sind keine Ofenanlagen vorhanden.

Konventionelle Produktionsverfahren

Die Herstellung von Zement erfolgt in zwei Stufen. Im ersten Schritt werden feingemahlener Kalkstein und Ton bei Temperaturen von 1.450 °C zu Portlandzementklinker (auch Zementklinker oder nur Klinker genannt) gebrannt. Dabei wird im Kalkstein gebundenes CO₂ abgespalten. Diese Prozessemissionen sind für etwa zwei Drittel der Gesamtemissionen der Zementherstellung verantwortlich, der Rest entsteht durch fossile Brennstoffe für den Ofenbetrieb.

Im zweiten Schritt wird Klinker zusammen mit Zuzugstoffen wie Kalkstein, Hüttensand, Flugasche und Gips zu Zement gemahlen. Die Zusammensetzung der Bestandteile bestimmt die betontechnischen Eigenschaften (z. B. Festigkeit, Erstarrungsverhalten, Dauerhaftigkeit) und damit die Anwendungsbereiche (z. B. Hoch- oder

Tiefbau, Innen- oder Außenbauteile) der Zemente. Normen legen Zusammensetzung, Anforderungen und Anwendungsbereiche für ein Portfolio an Normzementen fest.

Die THG-Emissionen der deutschen Zementwerke betragen derzeit pro Jahr rund 20 Mio. t CO₂-eq. Die Höhe der Emissionen hat sich innerhalb der letzten Dekade kaum verändert.

Vermeidungstechnologien

Das Ziel einer (weitgehend) klimaneutralen Zementindustrie bis 2045 erfordert aus heutiger Sicht zwingend den Einsatz von CO₂-Abscheidung und -Speicherung bzw. -Nutzung. Entwickelt werden Alternativen, die den Bedarf an CO₂-Abscheidung verringern. Abbildung 2 zeigt verschiedene konventionelle und alternative Routen der Zementherstellung schematisch vereinfacht. Wieder sind (Zwischen-)Produkte grau unterlegt.

Einsatz neuer klinkerarmer Normzemente

Aus heutiger Sicht ist Klinker ein unverzichtbarer Bestandteil des Zements. Bei der Klinkerherstellung entsteht unvermeidbar CO₂. Eine Strategie zur Emissionsreduktion besteht daher in der Absenkung des Klinkeranteils im Zement. Die Entwicklung und Erprobung klinkerarmer Zemente wurde in der letzten Dekade durch den Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) vorangetrieben. Seit 2021 sind neue Zementarten genormt, die gegenüber etablierten Portlandkompositzementen, die zu mindestens 65% aus Klinker bestehen, den Klinkeranteil bis auf 35 % senken können. Ziel ist es, den über alle Zementarten gemittelten Klinkeranteil von heute 71 % bis 2045 auf 53 bis 63 % zu senken.

Ersetzt wird der Klinker durch größere Anteile an Zuzugstoffen, was jedoch mit Herausforderungen einhergeht: Die Zusammensetzung der Zemente wird komplexer und die betontechnischen Eigenschaften hängen immer stärker von der Leistungsfähigkeit der verwendeten Zuzugstoffe ab. Außerdem zeichnen sich bei hochwertigen Zuzugstoffen Engpässe ab. So wird

Hüttensand als Nebenprodukt der Eisenherstellung im Hochofen durch die Transformation der Stahlindustrie zunehmend zu einem knappen Gut und auch Flugasche wird infolge des Ausstiegs aus der Kohleverstromung kaum noch zur Verfügung stehen.

Deshalb wird nach Alternativen gesucht, Tonminerale sind hier vielversprechend. In Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit und die Realisierungsbedingungen für einen Masseneinsatz bestehen allerdings noch offene Fragen.

Schätzungen für das THG-Reduktionspotenzial klinkerarmer Zemente bis 2045 gegenüber heutigen Zementen liegen für prozessbedingte THG-Emissionen bei 30 bis 44 %, für brennstoffbedingte um 26 bis 42 %.

Die Preisentwicklung ist infolge der Auswirkungen des Ukrainekriegs auf die Rohstoff- und Energiepreise nur schwer abschätzbar. Vermutlich wird das Preisniveau zwischen klinkerarmen und konventionellen Zementen aber vergleichbar sein

Einsatz neuer Bindemittelsysteme

Eine zweite Option sind neue Bindemittel, die emissionsarmer sind als Klinker, aber eine vergleichbare Leistungsfähigkeit aufweisen. Vielversprechend sind calciumhaltige Bindemittelsysteme wie Celitement oder Solidia.

Celitement basiert auf neu entwickelten Calciumhydrosilikaten. Durch einen komplexen Herstellungsprozess ermöglichen diese Bindemittel einen deutlich niedrigeren Kalkanteil als bei den konventionellen Zementen. Dadurch muss weniger Kalkstein entsäuert werden, was sich positiv auf die CO₂-Emissionen auswirkt. Das THG-Einsparpotential gegenüber heutigen Zementen wird auf ca. 13 % bei den prozess- und 11 % bei den brennstoffbedingten Emissionen geschätzt.

Bei Solidia findet das Aushärten in einer CO₂-Atmosphäre statt mit dem Ziel, dass das bei der Herstellung freigesetzte CO₂ direkt wieder aufgenommen wird. Das THG-Einsparpotential

wird rohstofflich bei ca. 78 % erwartet, brennstofflich immer noch bei 10 %. Es eignet sich vorrangig für Fertigteile im seriellen Bauen.

Während für Solidia erste Industrieanlagen existieren, steht der Schritt von der Pilot- zur Industrieanlage für Celitement immer noch aus. Vor Eintritt in den Massenmarkt müssen sie aus Sicherheits- und Gewährleistungsgründen aufwendig getestet und genormt werden. Da dafür ca. 15 Jahre eingerechnet werden müssen, werden bis 2045 nur geringe Marktanteile zwischen 5 bis 10 % erwartet.

CO₂-Abscheidung

Weder die Einsparungen durch klinkerarme Zemente noch neue Bindemittelsysteme werden aus heutiger Sicht ausreichen, um bis 2045 Klimaneutralität in der Zementindustrie zu erreichen. Verbleibende CO₂-Emissionen müssen daher abgeschieden und gespeichert bzw. weiterverwendet werden.

Für die Abscheidung ist das Oxyfuel-Verfahren erfolgversprechend. Dabei erfolgt der Brennprozess des Klinkers in einer Sauerstoffatmosphäre anstatt mit Umgebungsluft. CO₂ kann dabei in hoher Konzentration abgeschieden werden. Die Brennöfen könnten entsprechend nachgerüstet werden.

Allerdings führt das Oxyfuel-Verfahren zu einem wesentlich höheren Strombedarf in der Klinkerherstellung, was sich in höheren Betriebskosten niederschlägt. Nach der Reinigung und Verflüssigung kann es über ein Leitungssystem abtransportiert werden. Geeignete Lagerstätten befinden sich beispielsweise in der Nordsee vor der norwegischen Küste. Ein entsprechendes Pipelinesystem müsste noch realisiert werden.

Grundchemikalien

Unter High-Value Chemicals (HVC) werden organisch-chemische Grundchemikalien verstanden, von denen besonders viele Folgeprodukte (z. B. Kunststoffe, Waschmittel, Lacke, Kühlmittel, Weichmacher) und Wertschöpfungsketten der chemischen Industrie abhängen bzw. ausgehen. Sie werden in zwei Gruppen eingeteilt:

• Olefine: Ethylen, Propylen und Butadien

- Aromaten: Benzol, Toluol und Xylol – BTX-Aromaten.

In Deutschland werden derzeit über 13 Mio. t HVC pro Jahr produziert, davon rund 80 % Olefine und 20 % Aromaten.

Konventionelle Produktionsverfahren

Die Herstellung von HVC erfolgt bisher fast ausschließlich auf der Basis von Erdölfraktionen in petrochemischen Raffinerien. In Deutschland dominiert das Steamcracken. Dabei wird Naphtha, ein Erdöldestillat im Siedebereich von Benzin, in einem Rohrreaktor für wenige Sekunden Temperaturen von ca. 800 °C ausgesetzt, wobei sich verschiedene HVC abspalten. In Deutschland werden aktuell 13 Steamcracker an 6 Chemiestandorten betrieben.

Die dabei emittierten Treibhausgase summieren sich aktuell auf 8 Mio. t CO_{2-eq} pro Jahr für die Prozessführung und rd. 11 Mio. t CO_{2-eq} pro Jahr für die Bereitstellung der Rohstoffe (Rohölgewinnung und Herstellung von Naphtha).

Vermeidungstechnologien

Die zum Steamcracken notwendigen Temperaturen werden derzeit vorwiegend mit fossilen Brennstoffen erzeugt. Die prozessbedingten Emissionen lassen sich daher durch Elektrifizierung eindämmen. Um die rohstoffbedingten THG-Emissionen zu reduzieren, wird fossiles Naphtha durch emissionsarm hergestellte Kohlenwasserstoffe substituiert. Dies kann beispielsweise synthetisches Naphtha, das aus (abgeschiedenem) CO₂ und H₂ aus der Wasserelektrolyse gewonnen wird, oder Pyrolyseöl aus dem chemischen Recycling von Altkunststoff sein. Damit stehen viele verschiedene alternative Produktionsrouten zur Verfügung (s. Abbildung 3).

Vielversprechend sind hier drei alternative Herstellungsrouten.

E-Cracker

Zur Elektrifizierung des Steamcrackers müssen die Gas- durch Elektroöfen ersetzt werden, die übrige Anlagentechnik lässt sich weiterverwenden. Zwar steigt der Strombedarf der Anlagen um das Zehnfache. Wird Strom aus erneuerbaren Energiequellen eingesetzt, lassen sich die prozessbedingten THG-Emissionen trotzdem vollständig vermeiden. Die industrielle Umsetzung der Elektrifizierung wird aktuell nachdrücklich verfolgt, sie wird in den kommenden Jahren abgeschlossen werden können.

Wird weiter fossiles Naphtha eingesetzt, bleiben die rohstoffbedingten THG-Emissionen bestehen. Durch einen Wechsel auf synthetisches Naphtha aus CO_2 und grünem Wasserstoff bzw. auf Pyrolyseöl aus dem chemischen Recycling (s. u.) lassen sich auch diese Emissionen praktisch auf null reduzieren. Hierfür sind allerdings große Mengen an erneuerbaren Energien bzw. an Altkunststoffen erforderlich.

Methanol to Olefin (MtO)

Mit dem MtO-Verfahren können Olefine wie Ethylen und Propylen aus Methanol katalytisch hergestellt werden. Die Prozessenergie wird elektrisch zugeführt, sodass bei Verwendung von erneuerbarem Strom keine THG anfallen. Allerdings ist der Prozess energieintensiv. Das in großen Mengen erforderliche Methanol kann emissionsfrei über die Synthese von CO_2 und grünem Wasserstoff hergestellt werden (sog. grünes Methanol). In Deutschland sind noch keine MtO-Anlagen großtechnisch in Betrieb, u. a. weil dafür Neuanlagen mit hohen Investitionskosten erforderlich sind.

Chemisches Recycling

Beim chemischen Recycling werden die Ausgangsstoffe für die HVC-Produktion aus Kunststoffabfällen gewonnen. Eines der dafür genutzten Verfahren ist die Pyrolyse. Dabei wird Altkunststoff bei Temperaturen von

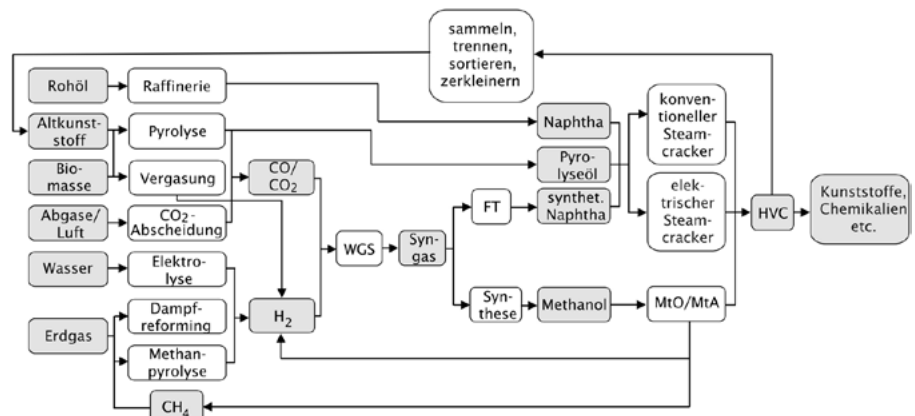


Abb. 3: Routen der HVC-Produktion (vereinfachte Darstellung; WGS: Wassergasshift; FT: Fischer-Tropsch-Synthese).

300 bis 700 °C unter Sauerstoffabschluss in ein Gemisch aufgespalten, das aus festen, flüssigen (Pyrolyseöle) und gasförmigen Anteilen besteht. Die Öle weisen ähnliche Eigenschaften wie Naphtha auf und können gut in E-Crackern zu HVC weiterverarbeitet werden. Allerdings ist dafür fast der dreifache Energieeinsatz im Vergleich zu fossilem Naphtha erforderlich. Mit Blick auf die Emissionsbilanz ist der Einsatz erneuerbarer Energieträger unumgänglich.

Obwohl am chemischen Recycling von Kunststoffabfällen seit den 1980er Jahren intensiv geforscht wird, blieb bisher wegen technischer Schwierigkeiten und hoher Kosten eine breitere Anwendung aus. Deutlich steigende Preise für fossile Energieträger dürften die Wirtschaftlichkeit des chemischen Recyclings aber begünstigen, sodass für die nächsten Jahre ein starker Markthochlauf erwartet wird.

Entwicklungspfade für eine klimaneutrale Produktion von Grundstoffen

Je nach Auswahl der Vermeidungstechnologien und der Umstellungsgeschwindigkeit sind viele Entwicklungspfade hin zu einer weitgehend klimaneutralen Grundstoffindustrie bis 2045 denkbar. Jeder wird mit spezifischen Ressourcenbedarfen, Kosten und Auswirkungen, z. B. auf die Bruttowertschöpfung, die Beschäftigung oder die Umwelt, verbunden sein.

Im Rahmen eines Projektes der Technikfolgenabschätzung wurden für die drei dargestellten Grundstoffe zwei Szenarien mit besonderem Blick darauf erstellt, wie sich eine auf Deutschland konzentrierende (Pfad A) von einer international vernetzenden (Pfad B) Strategie unterscheidet.

Eisen/Stahl

Bei der Eisen- und Stahlherstellung erfordert ein Wechsel auf wasserstoffbasierte Verfahren den Neubau der Produktionsanlagen. Das Zeitfenster hierfür öffnet sich jeweils, wenn ein Hochofen das Ende seiner Nutzungszeit erreicht. Die Entwicklungspfade können daher auf Ebene der einzelnen Standorte bzw. Anlagen beschrieben werden.

Bei einer überwiegend **national ausgerichteten Strategie** wird die Entwicklung insbesondere von einer limitierten Verfügbarkeit an inländisch erzeugtem grünem Wasserstoff geprägt. Es würde dann stärker in eine Nachrüstung bestehender Anlagen investiert: in die Verbesserung der Energieeffizienz und in die CO_2 -Abscheidung. Durch eine Verbesserung der Materialeffizienz sowie verstärkte Materialsubstitution beim Stahleinsatz wird für dieses Szenario ein Rückgang der Stahlnachfrage von 10 % unterstellt. Eine Substitution fossil befeuerter Anlagen durch wasserstoffbasierte Routen wird erst ab 2030 erwartet.

Für einen **international vernetzten Entwicklungspfad** kann grüner Was-

serstoff besser importiert werden. In diesem Pfad werden daher weniger ambitionierte Anstrengungen im Bereich Materialeffizienz und -substitution und somit ein nur geringfügiger Rückgang in der Stahlnachfrage unterstellt. Bis 2036 werden so im Szenario nur zwei kleinere Stahlwerke (mit einer Produktionskapazität von 3,7 Mio. t Rohstahl pro Jahr) stillgelegt. Die Wandlung der verschiedenen Produktionsrouten wird schon ab etwa 2025 deutlich sein: Bis 2030 trägt die wasserstoffbasierte Produktion bereits zu ca. 30 % zur Stahlproduktion bei, 2050 werden nur noch 5 % des Stahls aus dem Hochofen stammen.

Im Vergleich reduzieren sich bis 2045 die THG-Emissionen in beiden Pfaden um rund 90 % - allerdings nur, wenn konsequent bei jeder Investitionsentscheidung zur Neuzustellung eines Hochofens auf emissionsarme Technologien umgestellt wird. Schnellere Reduktionen wären technisch machbar, für die Betreiber aber mit hohem Aufwand und Risiken verbunden, da mehrere Anlagen zeitgleich umgestellt werden müssten.

Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit ergibt sich ein interessantes Bild (s. Abbildung 4). Für beide Pfade werden ab 2045 nahezu gleiche Kosten von ca. 520 Euro/t Rohstahl erwartet. Sie liegen 35 % über denen des Vorkrisenniveaus vor der Covid-19-Pandemie und dem Ukrainekrieg.

Jedoch ist der zeitliche Verlauf der Mehrkosten klar verschieden: In Pfad A

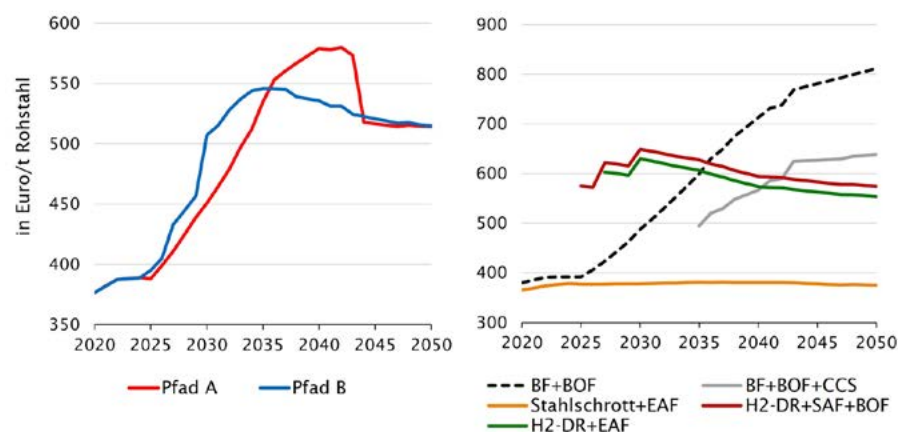


Abb. 4: Produktionskosten Stahl. Links: durchschnittliche Produktionskosten nach Entwicklungspfad, rechts: spezifische Produktionskosten nach Route für Entwicklungspfad B.

(national) werden die Kostensteigerungen bei CO₂-Emissionszertifikaten später als in Pfad B (international vernetzt) stabilisiert, während der frühere und stärkere Technologiewechsel von Pfad B zu deutlich höheren Investitions- und Betriebskosten schon ab 2025 führt (Preistreiber ist vor allem der extern bezogene Wasserstoff). Die Abbildung 4 zeigt rechts exemplarisch für Pfad B die spezifischen Produktionskosten je Route (ähnliche Werte ergeben sich für Pfad A). Es fällt auf, dass alle drei emissionsarmen Routen in einem ähnlichen Korridor von 500 bis 600 Euro/t Rohstahl liegen, so dass sich hieraus keine Präferenz für eine Technologieoption ableiten lässt. Abgebildet sind ferner die projizierten Produktionskosten der konventionellen Hochofenroute (gestrichelte Linie): Demnach wird die Kostenparität zwischen konventionellen und wasserstoffbasierten Routen Mitte der 2030er

Jahre erreicht, danach ist grüner Stahl günstiger.

Zement

Die bestehenden Zementwerke können zu jeder Zeit auf die Vermeidungstechnologien umgestellt werden. Zeitlich bestimmend sind die Genehmigungs- und Zulassungsverfahren. Einige der oben diskutierten neuen Zemente und Bindemittel sind aktuell weder genormt noch zugelassen.

In Entwicklungspfad A (**wenig Kooperation**) wird erwartet, dass bis 2035 die klinkerarmen hüttensandhaltigen Zemente überwiegen. Danach reduziert sich deren Marktanteil aufgrund der abnehmenden Verfügbarkeit an Hüttensand bis 2050 auf noch 7 %. An ihre Stelle treten klinkerarme Zemente auf der Basis von calcinierten Tonen. Für die alternativen Bindemittel werden infolge der beschriebenen Innovationshemmnisse nur Marktanteile von max. 13 % erwartet. Konventionelle Zementarten werden für bestimmte anspruchsvolle Anwendungsgebiete im Tief- und Hochbau voraussichtlich auch nach 2030 alternativlos bleiben. Hier bleibt nur die konsequente Nachrüstung der Anlagen mit CO₂-Abscheidung.

Eine **stärkere internationale Kooperation** (Pfad B) wird die Möglichkeiten des CO₂-Exports verbessern. Dies reduziert den Druck auf die Verbesserung der Effizienz und auf den Einsatz klinkerarmer Ze-

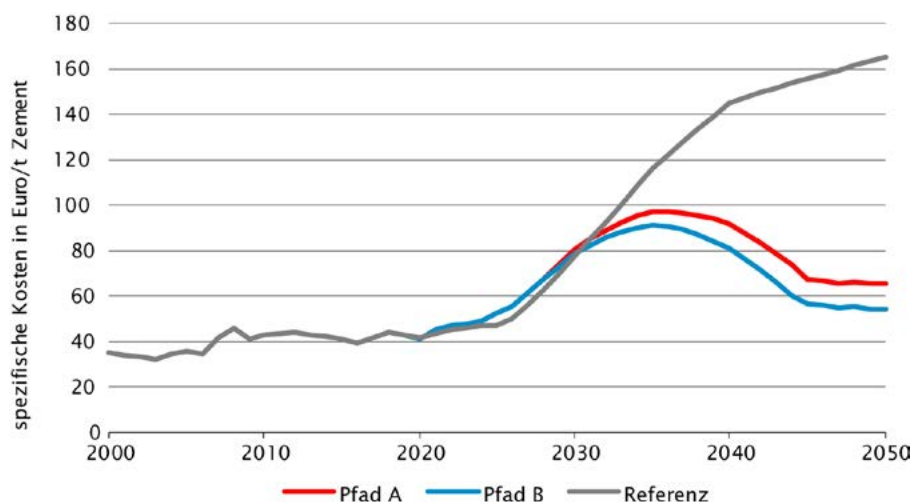


Abb. 5: Spezifische Kosten der Zementherstellung.

mente und neuer Bindemittel. Infolge der gegenüber Pfad A schnelleren Transformation der Stahlindustrie zur wasserstoffbasierten Direktreduktion müsste Hüttensand zunehmend importiert werden. Da auch andere Länder ihre Stahlindustrien dekarbonisieren, wird Hüttensand aber auch global immer knapper (bzw. teurer) werden.

Im Vergleich werden die THG-Emissionen im Wesentlichen vom Hochlaufen der CO₂-Abscheidung abhängen: In Pfad A werden Netto-null-Emissionen erst 2050 erreicht, in Pfad B bereits 2043 und anschließend – durch die Verwendung biogener Brennstoffe im Verbund mit CCS – sogar negative Emissionen (2050 in Höhe von 1,9 Mio. t CO_{2-eq}/Jahr)..

Die aus diesen Pfaden abgeleitete Kostenentwicklung zeigt Abbildung 5.

2045 werden die Produktionskosten pro Tonne Zement in Pfad A ca. 60 % über dem Vorkrisenniveau liegen, in Pfad B 53 % darüber. Der wichtigste Kostentreiber ist die CO₂-Bepreisung. Parität mit dem Referenzpfad (Produktion konventioneller Zemente ohne CO₂-Abscheidung) wird 2030 erreicht, danach ist die klimafreundliche Zementproduktion günstiger.

HVC

Aufgrund der großen Unsicherheiten in Bezug auf die Entwicklung der regionalen und internationalen Verfügbarkeiten von Rohstoffen für die HVC-Produktion (vor allem H₂, CO₂, Methanol, Altkunststoff und Biomasse) gestaltet sich hier die Erstellung plausibler Entwicklungspfade besonders schwierig.

Im überwiegend **national ausgerichteten Pfad A** wird die Umstellung auf den elektrischen Steamcracker forciert, um den Bedarf an CO₂-Abscheidung und damit einen möglichen Export von CO₂ gering zu halten.

Auch die MtO-/MtA-Route wird wegen der schwach ausgeprägten Importmöglichkeiten für grünes Methanol nicht stark verfolgt. Engpass in diesem Pfad ist die Verfügbarkeit von Wasser-

stoff zur emissionsarmen Herstellung der Rohstoffe. Bis 2045 wird der benötigte Wasserstoff zu 35 % in Eigenproduktion mittels Elektrolyse gewonnen und zu 17 % aus Nebenprodukten des Steamcrackers bereitgestellt. Knapp die Hälfte (bis 2045 rd. 1,3 Mio. t Wasserstoff) muss jedoch extern auf dem Markt bezogen werden. Der erforderliche Kohlenstoff wird zu einem Viertel durch Biomassevergasung bereitgestellt, drei Viertel müssen extern bezogen werden. Die deutschen Potenziale für chemisches Recycling von Altkunststoffen müssen möglichst vollständig ausgereizt werden

Unter Annahme **intensiver Kooperation** wird, wegen der besseren Importmöglichkeiten für grünes Methanol, die MtO-/MtA-Route stärker ausgebaut, sodass bis 2050 ein Drittel der HVC damit hergestellt werden. Wasserstoff wird zu zwei Dritteln auf dem (internationalen) Markt bezogen, 25 % fallen als Nebenprodukt der Steamcracker an, sodass lediglich 8 % mittels Elektrolyse selber hergestellt werden müssen. Beim Kohlenstoff werden drei Viertel der benötigten Menge auf dem Markt eingekauft, der Rest durch Biomassevergasung produziert.

Im Vergleich zeichnet sich für beide Pfade ein Wechsel von fossilen Brennstoffen hin zu Strom aus. In Pfad A ergibt sich durch den Fokus auf Eigenproduktion bis 2050 mehr als eine Verdopplung des Energiebedarfs gegenüber Pfad B (und gegenüber der Situation heute) auf 355 PJ/Jahr. Verantwortlich dafür ist v. a. der Strombedarf für die Elektrolyse. Die THG-Emissionen entwickeln sich in beiden Pfaden ähnlich, bis 2042 ist ein Rückgang auf Netto-null möglich. Durch den kombinierten Einsatz von Biomasse und CO₂-Abscheidung sind danach leichte negative Gesamtemissionen möglich. Die Produktionskosten steigen bis 2045 gegenüber dem Vorkrisenkostenniveau markant: In Pfad A um 130 %, in Pfad B um 90 %. Besonders der Wasserstoff wird den Preis treiben. Im Gegensatz zu Stahl und Zement liegen die Produktionskosten der klimafreundlichen Verfahren für den gesamten Betrachtungszeitraum über jenen der konventionellen Herstellungsverfahren.

Gesamtbetrachtung

Der errechnete Gesamtenergiebedarf der drei betrachteten Grundstoffindustrien liegt 2045 in Pfad A bei ca. 780 PJ/Jahr und damit nur minimal unter dem Bedarf von 2020 (785 PJ). In Pfad B liegt er rd. 20 % tiefer (rd. 630 PJ/Jahr), was vor allem auf die höhere Energieeffizienz der wasserstoffbasierten Stahlproduktion zurückgeht. Wasserstoff stellt in beiden Pfaden einen zentralen Bestandteil der Produktionsprozesse dar.

Hinsichtlich der Produktionskosten ist Pfad A von stärkeren Preisanstiegen geprägt als Pfad B. Gründe sind die höhere Eigenproduktionsquote, der höhere Energiebedarf und langsamer sinkende CO₂-Emissionen im Szenario mit hohem Selbstversorgungsgrad. Gegenüber einer auf internationale Kooperation ausgerichteten Strategie stellt Pfad A auch höhere Anforderungen an die Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien und inländisch erzeugtem Wasserstoff. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass ohne einen massiven Ausbau der erneuerbaren Energien, der Wasserstoffproduktion und der benötigten Infrastrukturen die hohen Abhängigkeiten bei Energieträgern und Rohstoffen vom Ausland bestehen bleiben bzw. weiter verstärkt werden.

Ökonomisch würde eine entlang der modellierten Pfade stattfindende Transformation der betrachteten Grundstoffindustrien zu einer kumulativen Erhöhung des Bruttoinlandsprodukts bis 2050 von ca. 16,3 Mrd. Euro führen (gemittelt über beide Pfade). Hauptgrund hierfür sind die notwendigen Mehrinvestitionen in die emissionsarmen Produktionsanlagen in Höhe von insgesamt knapp 15 Mrd. Euro (gegenüber einer Referenzentwicklung ohne Klimaschutz). Mit 8,6 Mrd. Euro am teuersten ist der Umbau der Stahlindustrie, gefolgt von der Zementherstellung (4,1 Mrd.) und der HVC-Produktion (2,2 Mrd.).

Die Preise von Endprodukten würden gemäß den Modellrechnungen wie folgt beeinflusst werden:

- Beim **Stahl** wird Mitte der 2030er Jahre Kostenparität erreicht und bis

2045 ist grüner Stahl 28 % günstiger als konventionell hergestellter. Davon am stärksten betroffen wären erwartungsgemäß die Herstellung von Metallerteugnissen sowie der Maschinen- und der Fahrzeugbau. So würde sich z. B. ein Personenkraftwagen im Wert von 30.000 Euro um maximal 480 Euro verteuern, 2045 wäre derselbe Wagen um 330 Euro günstiger.

- In der **Zementherstellung** liegen die Produktionskosten emissionsarmer Verfahren lediglich bis Ende der 2020er Jahre maximal 10 % über denjenigen der konventionellen. Eine Bauproduktion im Wert von 100.000 Euro würde sich dadurch schätzungsweise um 100 Euro verteuern. Bis 2045 sind grüne Zemente gemäß der Modellierung um ca. 60 % günstiger; dieselbe Bauproduktion wäre somit ca. 640 Euro günstiger.
- Eine klimafreundliche **HVC-Produktion** bleibt hingegen dauerhaft teurer als die konventionelle. Ein Medikament, das vor dem Umstieg 100 Euro kostet, würde sich um maximal 5,64 Euro verteuern.

Zusammenfassend scheinen die nachgelagerten Produktionsbereiche hinsichtlich ihrer preislichen Wettbewerbsfähigkeit somit nur in einem geringen Umfang von der Transformation der drei Grundstoffindustrien betroffen zu sein. Zu beachten ist allerdings, dass solche Modellierungen nicht frei von Unsicherheiten sind. Außerdem basieren die Analysen auf den vor Beginn des Ukrainekriegs abgeschätzten Preisentwicklungen.

Herausforderungen und politische Handlungsfelder

Die Transformation der energieintensiven Grundstoffindustrie hin zu Klimaneutralität ist technisch und wirtschaftlich voraussetzungsreich und für die produzierenden Unternehmen mit Risiken verbunden. Die Unternehmen werden die Transformation daher nicht alleine stemmen können. Daraus leitet sich für die Politik die Aufgabe ab, die Industrie beim notwendigen

Umbauprozess zu unterstützen. Im Rahmen des Projekts wurden daher mögliche Auswirkungen und Folgen der Transformation auf die Wettbewerbsfähigkeit, auf Wertschöpfungsketten und Importabhängigkeiten sowie auf Arbeitsplätze analysiert, um darauf gestützt politische Handlungsoptionen zu erarbeiten, die zu einem Gelingen der Transformation beitragen können. Nachfolgend werden ausgewählte Analyseergebnisse kurz vorgestellt.

Technische Realisierungsbedingungen durch gezielte Forschungs- und Entwicklungsförderung verbessern

Die Transformation der betrachteten Grundstoffindustrien wird als technisch machbar angesehen. Die industrielle Umsetzung hat aber gerade erst begonnen und ein großskaliger Einsatz ist noch nicht erreicht. Auf dem Weg dahin sind noch viele technische Detailfragen zu klären und verfahrenstechnische Herausforderungen zu meistern. Für die Unternehmen der Grundstoffindustrie, aber auch z. B. für den Maschinen- und Anlagenbau ist die Transformation daher mit einem hohen Aufwand für Forschung und Entwicklung verbunden. Politische Möglichkeiten, um die Unternehmen in dieser Hinsicht zu entlasten, sind ein Ausbau der projektbezogenen Forschungs- und Entwicklungsförderung, die Ausweitung der steuerlichen Forschungsförderung oder die Förderung von Pilot- und Demonstrationsvorhaben.

Integratives Gesamtkonzept für die Förderung

Zwischen den Grundstoffindustrien bestehen vielfältige Wechselwirkungen, wodurch sich der Technologiewechsel in einer Grundstoffindustrie auf die Rahmenbedingungen der Transformation in den anderen Grundstoffindustrien auswirken kann. Dies betrifft beispielsweise die Verfügbarkeit der begrenzt verfügbaren grünen Energieträger und Rohstoffe, um welche die Grundstoffindustrien untereinander, aber

auch mit anderen Sektoren (Gebäude, Verkehr) konkurrieren. Weitere Wechselwirkungen sind mit den vor- und nachgelagerten Branchen entlang der Wertschöpfungskette zu erwarten, zum Beispiel mit dem Maschinen- und Anlagenbau, der Energie- oder Bauwirtschaft. Nötig sind daher integrative Förderprogramme, die nicht nur einzelne Industrien adressieren, sondern die Transformation als branchen- und sektorübergreifende Aufgabe verstehen und alle Stufen der Wertschöpfungskette miteinbeziehen. Dazu wäre ein intensiverer Austausch zwischen allen relevanten Akteuren zu organisieren, um aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen zwischen den Branchen und Sektoren abgestimmte Förderstrategien ableiten zu können.

Transformation nicht durch einen Fachkräftemangel abbremsen

Die Transformation geht mit Veränderungen in den benötigten beruflichen Qualifikationen der Beschäftigten einher. Derzeit ist das Wissen darüber, welche beruflichen Qualifikationen künftig weiterhin bzw. zusätzlich erforderlich sind, aber noch lückenhaft. Ein besseres Verständnis ist nötig, um entsprechende Anpassungen in der beruflichen Aus- und Weiterbildung sowie in der akademischen Bildung vorzunehmen. Handlungsdruck besteht insbesondere in der Stahlindustrie, da hier der Technologiewechsel bereits in den kommenden Jahren ansteht (die Zement- und HVC-Produktion sind diesbezüglich weniger zeitkritisch).

Investitionen in klimaneutrale Produktionsprozesse anreizen

Emissionsarme Produktionsprozesse gehen im Vergleich mit konventionellen Technologien meist mit höheren Investitions- und Betriebskosten einher, was zu (temporär) höheren Produktionskosten führt. Die Kostenparität wird gemäß den durchgeführten Modellrechnungen für Stahl und Zement frühestens ab 2030 erwartet, emissionsarm hergestelltes HVC dürfte dagegen dauerhaft teurer bleiben. Investitionen in klimafreundliche Produktionspro-

zesse sind daher gegenwärtig wirtschaftlich unattraktiv. Um schon jetzt, also noch vor Erreichen der Kostenparität, Investitionen anzureizen, sind staatliche Förderprogramme zur Kompensation der klimaschutzbedingten Mehrkosten sinnvoll. Ein Beispiel dafür ist das neu aufgelegte Förderprogramm für Klimaschutzverträge des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, durch welches die Zusatzkosten einer emissionsarmen Produktion durch den Staat ausgeglichen werden. Wichtig ist allerdings, dass entsprechende Förderprogramme mit ausreichend hohen Mitteln ausgestattet werden.

Grüne Märkte für Endprodukte anregen

Vor allem für die HVC-Produktion fehlt es auch langfristig an ökonomischen Anreizen für Klimaschutzinvestitionen. Um den Preis für grünes HVC nicht dauerhaft durch staatliche Subventionen drücken zu müssen, sind zusätzliche Instrumente erforderlich. Eine Möglichkeit ist die Etablierung grüner Märkte für Endprodukte. Gemäß den hier vorgenommenen Modellrechnungen wirken sich die Kostensteigerungen bei den Grundstoffen nur marginal auf die Preise der Endprodukte aus. Bestätigt sich dies, könnte die Schaffung grüner Märkte auf Ebene der Endprodukte eine große Hebelwirkung entfalten, da sich so eine Nachfrage für die teureren klimafreundlichen Grundstoffe praktisch ohne finanziellen Mehraufwand für die Käufer der Endprodukte generieren ließe.

Internationalen Wettbewerb für Grundstoffe adressieren

Vor allem in der Stahl- und HVC-Produktion stehen die deutschen und europäischen Hersteller in einem starken internationalen Wettbewerb. Höhere Produktionskosten infolge steigender CO₂-Preise im europäischen Emissionshandel oder aufgrund der Umstellung auf emissionsarme Produktionsprozesse führen zu Wettbewerbsnachteilen gegenüber Unternehmen in Weltregionen, die aufgrund von weniger ambitionierten

Klimaschutzpolitiken geringere bzw. keine klimaschutzbezogenen Kosten zu tragen haben. Es besteht die Gefahr, dass Teile der europäischen Grundstoffproduktion in Länder verlagert werden, in denen weiterhin kostengünstig mit konventionellen Verfahren produziert werden kann (Carbon Leakage). Dies ist aus klima- und industriepolitischer Sicht unerwünscht, denn mit der Verlagerung industrieller Aktivität werden THG-Emissionen lediglich örtlich verlagert, während es in Deutschland zu Beschäftigungsverlusten kommt.

Der Sorge vor Emissionsverlagerungen wird bislang dadurch begegnet, dass Sektoren, die im internationalen Wettbewerb stehen, die Emissionszertifikate kostenlos zugeteilt erhalten. Allerdings mindert dies den Anreiz für Klimaschutzinvestitionen, weshalb die kostenlose Zuteilung ab 2026 für ausgewählte Industrien (darunter die Eisen/Stahl- und Zementproduktion, nicht aber die HVC-Produktion) schrittweise reduziert und bis 2034 ganz durch ein CO₂-Grenzausgleichssystem (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM) ersetzt werden soll. Auf entsprechende Importgüter wird dann eine Abgabe fällig, die sich am aktuellen CO₂-Preis im europäischen Emissionshandel orientiert. In seiner aktuellen Ausgestaltung umfasst der CBAM allerdings nicht die Exporte europäischer Unternehmen, wodurch die teureren europäischen Grundstoffe auf den Märkten anderer Weltregionen ggf. nicht mehr konkurrenzfähig sind. Sollte es dabei bleiben, so müssten die internationalen Abstimmungen und Harmonisierungen der Klimaschutzanstrengungen in den globalen Grundstoffindustrien vorangetrieben werden, um auf diese Weise gleiche Wettbewerbsbedingungen für alle Marktteilnehmer zu schaffen. Der Weg dahin ist aber noch weit.

Standortvorteile in Deutschland stärken

Eine Gefahr für Produktionsverlagerungen entsteht auch aus dem Umstand, dass grüne Energieträger und Rohstoffe in anderen Teilen der Welt deutlich kostengünstiger erzeugt wer-

den können als in Deutschland (Green Leakage). Beispielsweise könnte die wasserstoffbasierte Rohstahlproduktion zukünftig verstärkt in Ländern wie Schweden, Südafrika oder Australien stattfinden, die über gute Bedingungen für erneuerbare Energien und zugleich über hohe Erzvorkommen verfügen. Auch könnten Entwicklungsländer, die als potenzielle Lieferländer für grünen Wasserstoff infrage kommen, künftig bemüht sein, nicht nur Wasserstoff, sondern gleich den damit hergestellten Eisenschwamm (bzw. sogar grünen Stahl) nach Deutschland zu exportieren, um selber stärker an der Wertschöpfung der Stahlproduktion zu partizipieren.

Bei Standortentscheidungen der Unternehmen sind die Energie- und Rohstoffkosten aber nur ein Faktor von vielen. Weitere wichtige Standortfaktoren sind z. B. die Innovationsfähigkeit, die Verfügbarkeit von Fachkräften, die Kundennähe, eine hohe Rechtssicherheit, ein gutes Infrastrukturangebot oder die Zuverlässigkeit der Energieversorgung. In Bezug auf diese Faktoren sind Deutschland und Europa gegenüber vielen Ländern der Welt im Vorteil. Politische Anstrengungen zum Erhalt und zur Stärkung dieser Standortfaktoren erscheinen sinnvoll, um mögliche Nachteile durch hohe Energie- oder Rohstoffkosten zu kompensieren und so das Risiko für Green Leakage zu senken.

Planungssicherheit durch langfristige politische Rahmensezung

Unsicherheiten über wichtige zukünftige Rahmenbedingungen für die Grundstoffproduktion in Deutschland stellen auch bereits kurzfristig ein bedeutendes Risiko für die Attraktivität des Industriestandorts Deutschland dar. Planungssicherheit ist im anstehenden Transformationsprozess aufgrund der langfristigen Investitionsentscheidungen (mit Lebensdauern der Anlagen von häufig mehreren Jahrzehnten) von besonders hoher Bedeutung. Es ist folglich wichtig, der Grundstoffindustrie zeitnah eine möglichst große Klarheit über die zukünftigen Rahmenbedin-

gungen für die industrielle Produktion weit über 2030 hinaus zu geben. Dies betrifft zum einen politische Förderinstrumente, die ihre Wirkung über 2030 hinaus entfalten sollten, was aktuell nicht immer der Fall ist. Zum anderen wären zeitnahe politische Entscheidungen zum Aufbau einer leistungsfähigen CO₂-Transportinfrastruktur und gegebenenfalls großskaligen Speicherstätten in Deutschland erforderlich. Wichtig erscheint schließlich auch ein glaubwürdiges Bekenntnis der Politik, die Grundstoffindustrie in Deutschland halten zu wollen und sie bei der anstehenden Transformation zu unterstützen.

Fazit

Im Rahmen des Projekts der Technikfolgenabschätzung wurden die Realisierungsbedingungen für eine (weitgehende) Klimaneutralität bis 2045 anhand der drei emissionsintensivsten Grundstoffindustrien Eisen/Stahl, Zement und HVC analysiert und bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Transformation technisch machbar erscheint, obgleich eine Reihe an technologischen und politischen Herausforderungen gemeistert werden müssen. Um die Unternehmen der Grundstoffindustrie auf diesem Weg

proaktiv begleiten zu können, steht der Politik ein breites Spektrum an möglichen Unterstützungsmaßnahmen offen. Für das Gelingen einer weitgehend klimaneutralen Grundstoffindustrie in Deutschland bis Mitte dieses Jahrhunderts wichtig erscheint insbesondere ein integratives Gesamtkonzept, das die Transformation als eine branchen- und sektorübergreifende Aufgabe begreift und das über den Gegenstand der Untersuchung hinaus auch wichtige Konzepte der Nachhaltigkeit, wie etwa die Materialeffizienz und -suffizienz in Industrie und Gesellschaft, nicht ausklammert.

Leseempfehlung

Im LIT-Verlag ist ganz aktuell eine Untersuchung von Gerhard Wiesenfarth zum Handeln erschienen. Er nimmt darin das alltägliche technische Handeln in einem sehr grundlegenden Verständnis in den Blick, von den Sinnzusammenhängen aus.

Seine handlungstheoretischen Überlegungen nutzt Wiesenfarth als Begründung für seinen technikdidaktischen Ansatz: Ein Unterricht, der auf ein Verstehen durch Handeln abzielt, ist die Basis für ein verständiges Handeln in unserer technisierten Welt und für das Verstehen von Technik, das Erkennen ihrer Voraussetzungen, ihrer Mittel, ihrer Ziele und ihrer Folgen. Damit gelingt Wiesenfarth, die Trennung zwischen Kognition und Handeln aufzulösen – ein wichtiger Beitrag zur Technikdidaktik.

Gerhard Wiesenfarth: Handeln – Eine Erkundung in technischer und didaktischer Perspektive

Herausgegeben von Martin Binder, Burkhard Sachs und Kornelia Möller. LIT Verlag Berlin, Münster, London, Wien, Zürich, 2025. 24,90 Euro. ISBN 978-3-643-15663-1

