

Prozessemissionen in der deutschen Industrie und ihre Bedeutung für die nationalen Klimaschutzziele – Problemdarstellung und erste Lösungsansätze

Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES) im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, und Nukleare Sicherheit (BMU)

Executive Summary

Kontext der Untersuchung und Untersuchungsgegenstand

Die Treibhausgasemissionen des deutschen Industriesektors werden von einigen wenigen Grundstoffindustrien, die jedoch für die industrielle Wertschöpfungskette von erheblicher Bedeutung sind, dominiert. Eine weitere Besonderheit ist es, dass etwa ein Drittel der industriellen Treibhausgasemissionen nicht energiebedingt ist, sondern aus chemischen Umwandlungsprozessen der in den Grundstoffbranchen eingesetzten Rohmaterialien sowie der industriellen Verwendung besonders potenter, spezieller Treibhausgase herrührt.

Die hier vorgestellte Studie zeigt die wichtigsten Emissionsquellen auf, benennt technologische Innovationen, die potenziell zu einer zielkonformen THG-Minderung führen könnten, und analysiert deren technische und wirtschaftliche Hemmnisse. Dabei werden exemplarisch diejenigen Branchen untersucht, die besonders relevante Mengen an Prozessemissionen verursachen. Dies sind die Rohstahlerzeugung, die Herstellung von Zement, Kalk, sowie Ammoniak und Aluminium. Die Untersuchung basiert auf einer ausführlichen Literaturrecherche sowie Expertengesprächen mit Vertreterinnen und Vertretern von Unternehmen aus den genannten Branchen.

Im Jahr 2015 waren die Prozessemissionen der Industrie für knapp 7 % aller Treibhausgasemissionen Deutschlands verantwortlich. Die Metallherstellung, die Herstellung mineralischer Erzeugnisse, sowie die Herstellung verschiedener Grundchemikalien, darunter insbesondere Ammoniak, machen mit 43,8 Mio. t CO₂ _{äq.} rund 71 % der industriellen Prozessemissionen aus. Letztere haben sich seit 1990 um insgesamt 36 % reduziert.

Technologische Handlungsoptionen in ausgewählten Branchen

Querschnittsthema „grüner“ Wasserstoff und Ammoniakproduktion

Wasserstoff findet in der Industrie bereits heute erhebliche Verwendung und wird fast ausschließlich aus fossilen Kohlenwasserstoffen gewonnen, im Wesentlichen aus Erdgas. Die im Hinblick auf ihre THG-Vermeidungswirkung vielversprechendste Technologie, die Wasserelektrolyse, ist nur für 7 % der Gesamtproduktion verantwortlich. Zwar könnten durch die Substitution der Dampfreformierung von Erdgas etwa 5,6 Mio. t CO₂ eingespart werden, der spezifische Energieeinsatz der Wasserelektrolyse ist aber viermal so hoch wie bei der Dampfreformierung. Sofern erneuerbarer Strom für die Elektrolyse eingesetzt wird, ist diese allerdings emissionsfrei.

Die Elektrolyse ist ein grundsätzlich bekannter Prozess, die Technologiereife der Wasserelektrolyse unterscheidet sich je nach Anlagenart. Die Untersuchung bietet eine Darstellung zentraler Eigenschaften der relevantesten Elektrolisetechnologien¹. Diese entscheiden sich auch hinsichtlich ihres Entwicklungs- und Anwendungspotenzials. So ist die Hochtemperaturelektrolyse zwar eine bislang wenig ausgereifte Technologie, ihr Diffusions-

¹ Alkalische Elektrolyse, Protonenaustauschmembran-Elektrolyse, und Hochtemperaturelektrolyse

Potenzial kann jedoch aufgrund der möglichen Nutzung industrieller Abwärme als besonders vielversprechend eingeschätzt werden.

Die Untersuchung zeigt, dass die dargestellten Elektrolysetechnologien unter den gegebenen Rahmenbedingungen (z.B. Strompreis) kaum wettbewerbsfähig mit der Erdgasreformierung sind. Daher müssten entweder die spezifischen Technologieinvestitionen durch Forschung und Entwicklung noch stärker sinken, und/oder die Nutzung der fossilen Kohlenstoffträger verteuert werden.

Primärstahlproduktion

Das weltweit dominierende Verfahren zur Produktion von Primärstahl, die integrierte Hochofenroute, ist durch den Einsatz fossiler Kohlenstoffträger sehr emissionsintensiv. Lässt man inkrementelle Verbesserungsoptionen, die weiterhin auf Kohlenstoff setzen, vor dem Hintergrund des Klimaziels beiseite, verbleiben technologische Ansätze auf Wasserstoffbasis sowie die Eisenerzelektrolyse als technologische Handlungsoptionen. Die Technologiereife der Eisenerzelektrolyse ist jedoch begrenzt, in der Literatur wird eine mögliche Marktreife für 2040 angegeben, wobei derzeit kein relevantes Forschungsvorhaben dazu bekannt ist.

Die Nutzung von Wasserstoff als Reduktionsmittel kann jedoch auf marktgängiger Technologie aufsetzen. So wird die erdgasbasierte Direktreduktion von Eisenerz in manchen Weltregionen, in denen die Wettbewerbsfähigkeit gegeben ist, seit Jahrzehnten in industriellem Maßstab eingesetzt. Die Substitution des erdgasbasierten Reduktionsgases durch Wasserstoff im Schachtofen stellt kein grundsätzliches technologisches Problem dar. Hingegen ist die Wirtschaftlichkeit sowohl der Investition in neue Schachtöfen als auch hinsichtlich der Deckung der höheren Betriebskosten (Rohmaterial, Strom) nicht gegeben, da die Substitution bestehender Hochofenrouten nicht mit Produktverbesserungen einhergeht.

Die Nutzung von fossilem Kohlenstoff aus der Primärstahlerzeugung, d.h. CCU, erscheint sowohl vor dem Hintergrund der zweifelhaften THG-Vermeidungswirkung als auch der wirtschaftlichen Machbarkeit nicht als prioritär zu verfolgende Option.

Primäraluminiumproduktion

Hinsichtlich der Vermeidung der Prozessemissionen der Aluminiumproduktion werden bereits seit langem verschiedenste Technologieansätze diskutiert, darunter als entscheidender Ansatz die inerte Anode. Nach Expertenaussagen ist keine Pilotanlage bekannt, die das Funktionieren einer inerten Anode im industriellen Maßstab nachweist. Im Bereich der Produktionsprozesse werden insgesamt von den befragten Unternehmen in mittelfristiger Perspektive prinzipiell keine radikalen Innovationen erwartet, die eine erhebliche Vermeidung der heute noch emittierten Prozessemissionen bewirken könnten. Hingegen werden Fortschritte bei der Prozessstabilisierung und –steuerung erwartet, welche zur Vermeidung energiebedingter Emissionen beitragen könnten.

Herstellung von Zement

Drei verschiedene Ansätze für eine emissionsarme Herstellung von Bindemitteln werden untersucht: die Reduktion des Klinkeranteils durch Mehrkomponentenzemente, alternative Bindemitteln, sowie CCU/CCS. Es zeigt sich, dass das noch verbleibende Minderungspotenzial von Mehrkomponentenzementen absehbar sehr begrenzt sein wird. Verschiedene CCU/CCS-Technologien werden derzeit im Rahmen von Pilotvorhaben, oftmals in europäischen Konsortien und gefördert durch Horizon 2020, getestet. Derzeit ist noch unklar, ob sich die Nutzung von End-of-Pipe-Technologien für die Zementherstellung vermeiden lässt. Denn der verbleibende vielversprechende Ansatz, die Herstellung und Produktion alternativer Bindemittel, ist noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Als

Spezifikum der Branche ist festzuhalten, dass Bindemittel die Sicherheit und Funktionalität ihrer Anwendung in der Regel über viele Jahrzehnte sicherstellen müssen. Dies erschwert eine zeitlich ambitionierte Herangehensweise, da die Anwendung neuer Bindemittel in Pilotvorhaben langjährige Praxistests durchlaufen müsste, bevor eine Investition in eine Demonstrationsanlage in industriellem Ausmaß möglich erscheint.

Politische Handlungsansätze

Die formulierten Handlungsansätze für alle untersuchten Branchen umfassen insgesamt das gesamte Spektrum von F&E-Förderprogrammen, Pilotvorhaben und Demonstrationsprojekten, ökonomischen Anreizen und Regulierung bis hin zur Entwicklung politischer Strategien. Gleichwohl handelt es sich nicht um im Detail ausformulierte Maßnahmenvorschläge. Für eine ausführlichere Darstellung muss hier auf die Untersuchung bzw. die ebenso vorliegende Zusammenfassung verwiesen werden, im Folgenden werden die Handlungsansätze nur kurz umrissen.

Querschnittsthema „grüner“ Wasserstoff

Um die Wettbewerbsfähigkeit von Elektrolyse-Wasserstoff zu verbessern, ist die Hebung von Kostensenkungspotenzialen durch weitere Technologieentwicklung, beispielsweise im Hinblick auf die Steigerung des Wirkungsgrades, erforderlich. Insbesondere für den vielversprechenden Hochtemperaturelektrolyseur wird eine Intensivierung der F&E-Förderung empfohlen. Darüber hinaus sind weitere Demonstrationsanlagen erforderlich, um die Optimierung der Betriebsführung voranzubringen. Neben der Weiterentwicklung der Technologie ist jedoch auch eine absehbare Nachfrage am Markt zu schaffen, die ohne regulatorische oder anreizende Maßnahmen derzeit nicht absehbar erscheint. Denkbar wäre hier die Erhöhung des Wasserstoffanteils im Erdgasnetz. Instrumentell könnte dies sowohl durch eine Einspeisevergütung, finanziert über eine Umlage, angereizt, oder durch eine Einspeiseverpflichtung für die Netzbetreiber, regulatorisch umgesetzt werden. Auch die Entlastung von EE-Strom für die Wasserelektrolyse bzw. alternativ eine stärkere Belastung fossiler Energieträger könnte die Wettbewerbsfähigkeit von grünem Wasserstoff befördern.

Primärstahlproduktion

Auch bei der Primärstahlproduktion sollten F&E Vorhaben weiterhin gefördert werden, auch bzgl. der Eisenerzelektrolyse. Hier gibt es jedoch mit der Direktreduktion von Eisenerz im Schachtofen, bei (ggf. anteiliger) Umstellung des gängigen, erdgasbasierten Reduktionsgases auf grünen Wasserstoff, bereits eine technologisch weit fortgeschrittene Alternative zur Hochofenroute. Diese ist jedoch unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht wettbewerbsfähig zu betreiben. End-of-Pipe Technologien wie CCU erscheinen für die Stahlherstellung weder zielführend noch erforderlich. Da eine klare politische Strategie für eine klimafreundliche, innovative Zukunft der Primärstahlherstellung fehlt, wird hier empfohlen, eine solche „Innovationsstrategie Stahl“ zu entwickeln und zu implementieren. Vor dem Hintergrund der langen Lebenszyklen der Anlagen, der langen Innovationszyklen, sowie dem Klimaschutzziel 2050 erscheint eine Fokussierung dringend geboten. Diese sollte einen klaren carbon direct avoidance (CDA) Ansatz verfolgen. Diese Strategie müsste beispielsweise Einfluss nehmen auf die Forschungs- und Entwicklungsagenden auf nationaler und europäischer Ebene. Zu berücksichtigen wären ebenfalls die sich durch eine schrittweise Elektrifizierung der Stahlherstellung ergebenden Auswirkungen auf den Gesamtstrombedarf und notwendige Infrastrukturen. Ein weiterer Handlungsansatz, der die mangelnde Wirtschaftlichkeit von „grünem“ Stahl adressieren könnte, wäre die Eröffnung neuer spezifischer Abnehmermärkte, um eine Überwälzung von Mehrkosten zu ermöglichen. Der Materialwert von Stahl an den Herstellungskosten eines typischen Automobils beispielsweise liegt im unteren einstelligen Prozentbereich, so dass eine Überwälzung sowohl über Anreizmechanismen als auch über eine Regulierung möglich erscheint.

Primäraluminiumproduktion

Da nach wie vor, trotz jahrzehntelanger Forschung, keine marktreifen Technologien zur Vermeidung der Prozessemissionen der Primäraluminiumproduktion zur Verfügung stehen und dies auch in naher Zukunft nicht absehbar ist, erscheint die weitere kontinuierliche Unterstützung der Politik durch F&E-Förderprogramme der derzeit einzig praktikable Handlungsansatz zu sein.

Zementherstellung

Die Handlungsansätze für die Zementherstellung fokussieren im Wesentlichen auf die Förderung der Weiterentwicklung von alternativen Bindemitteln. Dies beginnt mit einem spezifischen F&E-Förderprogramm für alternative Bindemittel, das langfristig und leicht zugänglich ausgestaltet werden sollte. Neue Bindemittel müssen sich insbesondere hinsichtlich der gestellten Sicherheits- und Beständigkeitsanforderungen unter Beweis stellen, daher erscheint es sinnvoll, besonders vielversprechende Bindemittel mit langlaufenden Pilotvorhaben in der praktischen Anwendung zu fördern. So könnten spezifische Vor- und Nachteile in vergleichenden Untersuchungen mit klassischen Zementen aufgedeckt und Lösungsvorschläge für die Überwindung von absehbaren Marktdiffusionshemmnissen erarbeitet werden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen könnte dann eine Auswahl besonders geeigneter Bindemittel über die Förderung von Demonstrationsanlagen zur Herstellung dieser in industriellem Maßstab weiter vorangebracht werden. Begleitend könnten Aktivitäten zur Förderung eines Markteintritts durchgeführt werden. Die Diffusion wiederum könnte auch durch eine Abnahmeverpflichtung von alternativen Bindemitteln für bestimmte Bauvorhaben befördert werden. Voraussetzung hierfür wäre gerade die erfolgreiche Demonstration des Herstellungsprozesses in industriellem Maßstab und die Langzeitstabilität der Bindemittel in der Anwendung. Durch wissenschaftliche Vorarbeiten wäre zu klären, welche Bauvorhaben sich für eine Abnahmeverpflichtung eignen könnten. Denkbar wäre beispielsweise, dass sich eine solche zunächst auf solche Bauwerke konzentriert, die nur einen vorübergehenden Charakter haben, wie z.B. Behelfsbrücken oder bestimmte Sportstätten und Freizeiteinrichtungen.