



VIK Mitteilungen

Das Fachmagazin des Verbands der Industriellen Energie- & Kraftwirtschaft



ZUKUNFT WASSERSTOFF

Marktbedingungen
für H₂-Hochlauf

Grüner Wasserstoff
"Made in Denmark"
für Deutschland

Wasserstoff auf
dem Weg zur
Wirtschaftlichkeit



Grüne Importe der Grundstoffindustrie

Kosteneffiziente Aufteilung grüner Wertschöpfungsketten für eine langfristige Wettbewerbsfähigkeit

Grüne Energie wird in anderen Teilen der Welt günstiger sein als in Deutschland. Die deutsche Grundstoffindustrie könnte daher langfristig großem Wettbewerbsdruck aus dem an Erneuerbaren reichen Ausland ausgesetzt sein. Eine mögliche Lösung könnte der Fokus auf den Import grüner Vorprodukte wie grünes DRI, Ammoniak oder Methanol sein.

Dr. Philipp C. Verpoort, Wissenschaftler, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) e.V.

Die deutsche Grundstoffindustrie steht vor der gewaltigen Herausforderung, ihre Produktion in den nächsten 15 Jahren auf klimaneutrale Prozesse umstellen zu müssen. Dies betrifft insbesondere Stahl und chemische Grundstoffe, deren klimaneutrale Produktion zukünftig auf die stoffliche Nutzung von emissionsarmem Wasserstoff angewiesen sein wird. Zu diesem Zweck baut die deutsche Stahlindustrie derzeit Direktreduktionsanlagen, die schrittweise Hochöfen ersetzen könnten und die anfangs unter Einsatz von Erdgas Emissionen bereits stark reduzieren und langfristig unter Einsatz von Wasserstoff Emissionen nahezu vollständig vermeiden könnten. Ähnliche Überlegungen gibt es für die deutsche Chemieindustrie, die grünen Wasserstoff künftig zur Erzeugung von Ammoniak und von Methanol (oder Naphtha) als Ausgangsstoffe für Düngemittel, Kunststoffe und viele weitere chemische Erzeugnisse nutzen könnte. Die Bundesregierung fördert derzeit den Import von Wasserstoff sowie den Aufbau eines Wasserstoffkernnetzes.

Allerdings ist damit zu rechnen, dass andere Länder grünen Strom und grünen Wasserstoff unter deutlich besseren Bedingungen und damit zu niedrigeren Kosten bereitstellen können als Deutschland. Andere Teile der Welt verfügen über bessere Potenziale für Photovoltaik, Windkraft und/oder Wasserkraft und haben gleichzeitig eine viel geringere Energienachfrage aufgrund niedrigerer Industriedichte und Bevölkerungsdichte. Gleichzeitig lassen sich die wichtigsten grünen Energieträger (Strom und Wasserstoff) viel schlechter über lange Distanzen transportieren als fossile Energieträger (Kohle, Erdöl und Erdgas). Daraus resultiert ein Standortnachteil für die Grundstoffindustrie in Deutschland und ein Anreiz, energieintensive Produktion ins Ausland zu verlagern. Für einen solchen Anreiz hat sich in der Wissenschaft der Begriff „Renewables Pull“ etabliert. Verursacht der Renewables Pull tatsächlich eine Verlagerung, so spricht man von „Grüner Verlagerung“, bzw. „Green Relocation“¹.

In aktuellen Debatten um die Transformation spielen diese Effekte noch eine untergeordnete Rolle. Die Sorgen der deutschen Industrie drehen sich momentan vorrangig um wettbewerbsfähige fossile (und nicht grüne) Energiepreise, um CO₂-Bepreisung und Carbon Leakage sowie um (fossile) Überkapazitäten. Zudem steht ein globales Angebot für grüne Grundstoffe kurzfristig nicht in Aussicht.

Für die jetzt anstehenden Entscheidungen zum Bau von Infrastruktur und industriellen Anlagen ist es jedoch wichtig, den Blick etwa zehn Jahre in die Zukunft zu wagen. Bisherige Studien und Vergleiche zu Kosten und Preisen zwischen vorherrschenden fossilen und möglichen zukünftigen erneuerbaren Produktionswegen in Deutschland („grau vs. grün lokal“) sind wichtig, aber der Vergleich zwischen erneuerbaren Produktionswegen in Deutschland und dem an Erneuerbaren reichen Ausland („grün vs. grün global“) sollte zunehmend in den Fokus genommen werden, um die langfristige Wettbewerbsfähigkeit deutscher Produktionsstandorte und die resultierenden Zielbilder besser zu verstehen.

In unserer Studie befassen wir uns vorrangig mit der Primärproduktion von Stahl und chemischen Grundstoffen. Die Frage von grüner Verlagerung könnte auch für andere Grundstoffe und allgemein das verarbeitende Gewerbe relevant werden. Diese sind jedoch direkt elektrifizierbar (z. B. Wärmanwendungen) oder gar bereits elektrifiziert (z. B. Aluminium) oder benötigen CCS² (z. B. Zement), sodass Wasserstoff in vielen dieser Wertschöpfungsketten eine geringere Rolle spielt. Eine No-Regret-Maßnahme zum langfristigen Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der Grundstoffindustrie könnte die Steigerung des Sekundäranteils sein (Schrotteinsetzung beim Stahl, Kunststoff-Recycling usw.). Dieses Vorgehen ist jedoch auf die Verfügbarkeit der entsprechenden sekundären Ausgangsstoffe (Stahlschrotte, Kunststoffabfälle) abhängig und aus Gründen der Qualitätsanforderungen an Materialien begrenzt.

Studie zu möglichen Einsparpotenzialen

In einer Studie zeigen wir jetzt, dass im Jahr 2040 durch Produktion im an Erneuerbaren reichen Ausland statt in Deutschland die Produktionskosten um ca. 18 % für grünen Stahl und um ca. 32 % bis 38 % für grüne chemische Grundstoffe reduziert werden könnten (vgl. Abb. 1). Hieraus würde ein großer Wettbewerbsdruck für die deutsche Grundstoffproduktion aus dem an Erneuerbaren reichen Ausland entstehen. Ausschlaggebend für dieses Ergebnis sind vor allem Preisunterschiede von erneuerbarem Strom in Deutschland und im Ausland. Für diese Preise gibt es heute noch viel Unsicherheit, aber basierend auf unseren Vergleichen akademischer Studien zu Stromsystemen in verschiedenen globalen Regionen halten wir eine Strompreisdifferenz von 40 EUR/MWh zwischen Deutschland und möglichen globalen besonders an Erneuerbaren reichen Produktionsstandorten für realistisch.

Unsere Ergebnisse berücksichtigen neben Energiekosten auch Transportkosten und teilweise Unterschiede bei Finanzierungskosten. Schwer quantifizierbar sind hingegen „weiche“ Standortfaktoren wie bestehende Abnehmerbeziehungen, Infrastruktur, Standortintegration, Innovationstätigkeit, erhöhte Zahlungsbereitschaft von Abnehmern für Liefersicherheit usw. Diese wirken im Allgemeinen den Energiekosten zwar entgegen, werden die sehr hohen Energiekostennachteile deutscher Standorte jedoch nur teilweise ausgleichen können. Ankündigungen zu Schließungen, Drosselungen und Verlagerungen deutscher Grundstoffproduktion im Rahmen der jüngsten Energiekrise (ausgelöst durch ausfallende Gasimporte aus Russland) sind ein Indiz dafür, dass die von uns errechneten Energiekostennachteile für einen substanzialen Teil der deutschen Grundstoffproduktion zu einer tatsächlichen grünen Verlagerung in das an Erneuerbaren reiche Ausland führen würde.

¹ Manchmal wird statt Green Relocation auch der Begriff „Green Leakage“ in Anlehnung an den Begriff „Carbon Leakage“ verwendet. Während Carbon Leakage aus deutscher Sicht umfassend als negativ zu bewerten ist, kann grüne Verlagerung sowohl Vor- als auch Nachteile für die deutsche Wirtschaft und den globalen Klimaschutz bedeuten, sodass wir den Begriff Green Relocation bevorzugen, um eine ausgewogene Debatte zu ermöglichen.

² Carbon Capture and Sequestration.

Sweet Spot der Aufteilung grüner Wertschöpfungsketten: Import grüner Vorprodukte

In unserer Studie betrachten wir jedoch nicht nur den Fall einer vollständigen Verlagerung grüner Grundstoffproduktion in das an Erneuerbaren reiche Ausland, sondern auch Fälle, in denen nur die ersten, besonders energieintensiven (insbesondere wasserstoffintensiven) Verarbeitungsschritte im Ausland stattfinden, sodass sogenannte „grüne Vorprodukte“ (grünes DRI³, Ammoniak und Methanol) importiert werden könnten (vgl. Abb. 2). Diese Vorprodukte werden heute (auf Basis fossiler Produktion) bereits global gehandelt. DRI kann leicht zu HBI (Hot Briquetted Iron) kompaktiert und als Schüttgut transportiert werden⁴.

„Diese effiziente Arbeitsteilung – wasserstoffintensive erste Verarbeitung im Ausland, Import von Vorprodukten, Weiterverarbeitung in Deutschland – bezeichnen wir daher auch als einen möglichen „Sweet Spot“ der Aufteilung künftiger grüner Wertschöpfungsketten“

Wenn die Wertschöpfungskette der betrachteten Grundstoffe derart zerteilt würde, könnten Energiekosten fast so gut eingespart werden, als wenn die gesamte Wertschöpfungskette auf das Ausland entfiel. Gleichzeitig könnten durch den Import von Vorprodukten wichtige Teile der Wertschöpfung und Arbeitsplätze der verbleibenden Grundstoffindustrie in Deutschland erhalten bleiben. In der Stahlindustrie entfallen bspw. heute nur etwa 5 % der Arbeitsplätze auf die Roheisenerzeugung und die restlichen 95 % auf die Stahlerzeugung und -weiterverarbeitung. Nachgelagerte weiterverarbeitende Industriezweige wie Automobilbau, Maschinenbau, Kunststoffindustrie usw. (die volkswirtschaftlich noch viel relevanter sind) könnten zudem weiterhin ihre Produkte von lokalen Produzenten mit entsprechenden Qualitäten beziehen. Diese effiziente Arbeitsteilung – wasserstoffintensive erste Verarbeitung im Ausland, Import von Vorprodukten, Weiterverarbeitung in Deutschland – bezeichnen wir daher auch als einen möglichen „Sweet Spot“ der Aufteilung künftiger grüner Wertschöpfungsketten.

Unsere Studie zeigt zudem, dass eine Produktion der betrachteten Grundstoffe in Deutschland mit Wasserstoffimporten per Schiff die zuvor genannte Kostenlücke kaum verringern kann. Das liegt teils an der mittelfristig andauernden niedrigen Technologiereife solcher Schiffstransporte, aber teils auch an fundamentalen Ineffizienzen bei der Umwandlung von Wasserstoff in ein Transportmedium von höherer Dichte. Betrachtet man Kostenvergleiche der International Energy Agency (IEA), ist es dabei im Wesentlichen egal, ob der Transport in Form von Ammoniak, flüssigem Wasserstoff oder Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs) erfolgt. Kurzfristig sind die Chancen für Ammoniak als Transportvektor am besten aufgrund bestehender Schiffs- und Hafeninfrastruktur. Langfristig könnte die Verflüssigung von Wasserstoff die höchste Energieeffizienz aufweisen, zunächst ist hier jedoch noch viel Entwicklungsarbeit notwendig. Deutlich kostengünstiger könnte der Transport von Wasserstoffpipelines aus nahegelegenen Ländern (z. B. Norwegen, Spanien, Marokko) sein. Der Ausbau solcher Pipelines wird jedoch noch einige Zeit in Anspruch nehmen. Generell betrachten wir in unserer Studie bislang nur den Transport von Handelsgütern zwischen Landesgrenzen, wohingegen Netzentgelte für den innerdeutschen Pipeline-Transport von Wasserstoff zusätzlich hoch ausfallen könnten, wenn das geplante Kernnetz überdimensioniert wird.

Unabhängig von diesen Details kommen wir zu dem Schluss, dass Wasserstoffimporte per Schiff die deutschen Energiekostennachteile kaum ausgleichen können. Es ist aus fundamentalen physikalischen, technischen und ökonomischen Gründen effizienter, grüne Vorprodukte statt grünem Wasserstoff nach Deutschland zu importieren. Die „Sollbruchstelle“ dieser grünen Wertschöpfungsketten ist also – anders als bei den etablierten fossilen Wertschöpfungsketten – nicht beim Handel der Energieträger, sondern beim Handel von Gütern aus der ersten energieintensiven Verarbeitung.

Die Versorgungssicherheit beim Import grüner Vorprodukte könnte durch Diversifizierung der Nachfrage, langfristig liquide Märkte und Friendshoring gewährleistet werden. Es ist wichtig zu verstehen, dass beim Import grüner Vorprodukte langfristig mit einer viel geringeren Abhängigkeit zu rechnen ist, als dies

bei russischem Erdgas der Fall war. Erstens handelt es sich um Schiffs- statt um Pipeline-Importe, was eine viel geringere Abhängigkeit von einzelnen Lieferländern schafft. Zweitens

„Es ist aus fundamentalen physikalischen, technischen und ökonomischen Gründen effizienter, grüne Vorprodukte statt grünem Wasserstoff nach Deutschland zu importieren.“

sind die Ressourcen für die Produktion grüner Vorprodukte global viel diverser verteilt und ihre Nutzung erfolgt mit modularen Technologien, die deutlich weniger technische Kenntnisse voraussetzen, als dies heute bei der Förderung fossiler Rohstoffe der Fall ist. Die Etablierung diverser und liquider Märkte ließen sich dadurch viel leichter bewerkstelligen. Noch höhere Priorität sollte haben, die Produktion grüner Vorprodukte europäisch zu organisieren (z. B. grünes DRI aus Schweden oder grünes Ammoniak aus Spanien).

Die Stabilität eines solchen Sweet Spots

Wichtig zu klären ist die Frage, ob eine solche Aufteilung der Wertschöpfungsketten langfristig stabil wäre oder ob mit der Zeit ausländische Unternehmen und Staaten eine höhere Wertschöpfungstiefe anstreben und somit die vollständige Verlagerung der Produktion ins Ausland verursachen könnten.

Diese Frage können wir nicht abschließend beantworten, weil es hier viele Unsicherheiten gibt. Aus der Vergangenheit wissen wir jedoch, dass Standorte der deutschen Grundstoffindustrie immer schon trotz höherer Energiekosten Bestand haben konnten. Grund dafür waren vor allem die oben genannten „weichen“ Faktoren wie enge Abnehmerbeziehungen, Innovationstätigkeit, Produktheterogenität usw. Gerade diese wichtigen Standortfaktoren könnten erhalten bleiben, wenn Vorprodukte importiert und in Deutschland verarbeitet würden. So könnten bspw. deutsche Stahlhersteller weiterhin die Zusammensetzung, Qualität und Weiterverarbeitung ihrer Stähle kontrollieren und für ihre Abnehmer attraktiver bleiben als ausländische Konkurrenten. Gleichzeitig könnten Ener-

³ Direct Reduced Iron.

⁴ Den Energieverlust durch Abkühlen des DRI in Höhe von etwa 0,16 MWh pro Tonne Rohstahl wird in unseren Berechnungen berücksichtigt und stellt einen kleinen Verlust verglichen mit den Kostenersparnissen aufgrund hoher Energiepreisdifferenzen dar.

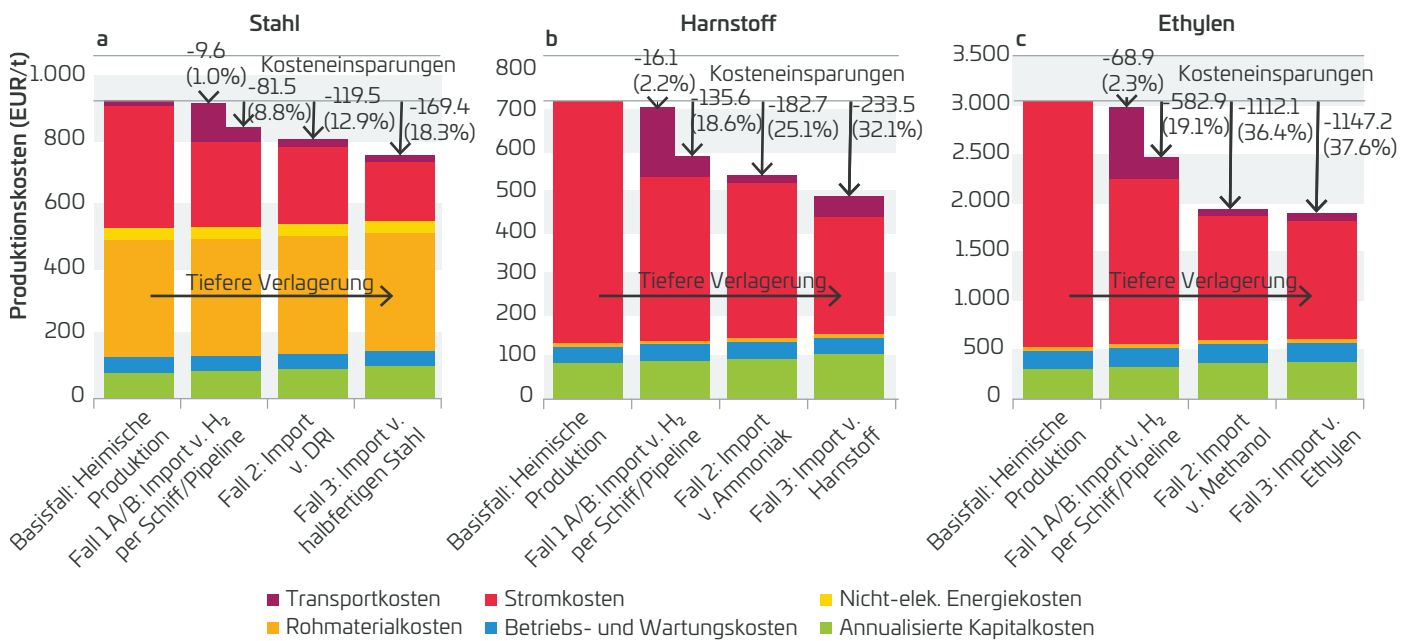


Abb. 1 | Produktionskosten ausgewählter Grundstoffe für verschiedene Importfälle. Dargestellt sind die Produktionskosten für die vier Fälle aus Abbildung 2 und einer Strompreisdifferenz von 40 EUR/MWh. a Stahl, b Harnstoff, c Ethylen. Die Aufschlüsselung der einzelnen Kostenkomponenten zeigt, dass die Einsparungen bei den Energiekosten durch hohe Transportkosten von Wasserstoffimporten per Schiff ausgeglichen werden. Nutzungsrechte: Lizenziert unter Creative Commons Attribution 4.0 International Lizenz. Die Abbildung wurde zuerst veröffentlicht in: P.C. Verpoort u. a. (2024): Impact of global heterogeneity of renewable energy supply on heavy industrial production and green value chains. Nat Energy 9, 491–503. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01492-z>

giekostennachteile gegenüber dem Ausland größtenteils ausgeglichen werden. Wir halten den Import grüner Vorprodukte somit zwar nicht für einen Garant für langfristige Wettbewerbsfähigkeit und Erhalt der deutschen Grundstoffindustrie, aber für die beste Chance darauf. Der Fokus von Wissenschaft, Politik und Industrie könnte fortan darauf liegen, die Stabilität dieses Sweet Spots noch besser zu verstehen und Maßnahmen zur Stärkung der Stabilität zu identifizieren.

Ein Wegsubventionieren der Kostenlücke wird teuer

Alternativ könnte versucht werden, die oben genannten Energiekostennachteile durch Subventionen für die energieintensive Industrie auszugleichen. Dabei ist zunächst egal, ob diese über direkte staatliche Subventionen oder über Umlagen (von z. B. Netzkosten auf andere Verbraucher) erfolgen. In unserer Studie zeigen wir, dass das sehr teuer werden könnte. Allein für die Grundstoffe Stahl, Düngemittel und Ethylen würden bei heutigen Produktionsvolumen langfristig Förderbedarfe von 5–15 Mrd. EUR fällig — jedes Jahr.

In aktuellen Debatten beobachten wir immer wieder Forderungen von Vertretern der Grund-

stoffindustrie nach Subventionen auf Energiepreise (z. B. einem festen Industriestrompreis, manchmal auch „Brückentrompreis“ genannt), Entlastungen bei Netzentgelten und generell „besseren Rahmenbedingungen“ bei Energiekosten. Kurzfristig könnten solche Entlastungen sinnvoll sein, um die angespannte Situation in der Industrie zu überwinden. Für die langfristige Ausrichtung braucht es jedoch ein ehrliche Debatte über die Kosten und die Sinnhaftigkeit solcher Zahlungen. Die Energiekostennachteile Deutschlands werden aufgrund des „Renewables Pulls“ wahrscheinlich nie verschwinden und eine „Brücke“ in eine Welt, in der deutsche Strompreise ohne Subventionen günstig sein können, daher wahrscheinlich nicht geben. Die Finanzmittel, die zum dauerhaften Ausgleich dieses Nachteils erforderlich wären, würden eine zusätzliche Belastung für den Staatshaushalt, für Privathaushalte und/oder für andere Unternehmen bedeuten. Sollte man sich (vielleicht auch nur übergangsweise) dennoch zu solchen Subventionen entscheiden, wäre es volkswirtschaftlich effizienter, diese auf einzelne Branchen zu fokussieren statt breit zu verstreuen. Außerdem könnten Subventionen bezogen auf Produkt-Benchmarks statt direkt auf die Energiekosten ausgezahlt werden, um

Anreize für Energieeffizienz und Flexibilität der Stromnachfrage zu erhalten.

Deutsche Transformationsprojekte sind trotzdem richtig

Unsere Studie weist darauf hin, dass das Zielbild einer klimaneutralen Grundstoffindustrie geschärft werden muss. Alle der heutigen Produktionsstandorte vollständig in Deutschland zu erhalten und mit Wasserstoffimporten zu versorgen, erscheint zunehmend unrealistisch. Gleichzeitig verfolgen Industrie und Politik mit ihren Projekten und Fördermitteln aktuell vorrangig diesen Ansatz.

Dieses Ergebnis darf jedoch nicht als Kritik an aktuellen Transformationsprojekten verstanden werden. Die im Bau befindlichen Anlagen sollten fertiggestellt und genutzt werden. Denn mittelfristig wird das globale Angebot für grüne Vorprodukte und Grundstoffe noch recht klein ausfallen. Das gilt insbesondere für grünen Stahl, wo Deutschland aktuell als Vorreiter vorausgeht. Heute gebaute Anlagen zur Erzeugung emissionsarmer und klimaneutraler Grundstoffe sollten, wenn Deutschland und die Welt es mit dem Klimaschutz ernst meinen, trotz höherer Energiekosten noch viele Jahre gewinnbringend laufen. Wenn Deutschland jetzt abwartet und

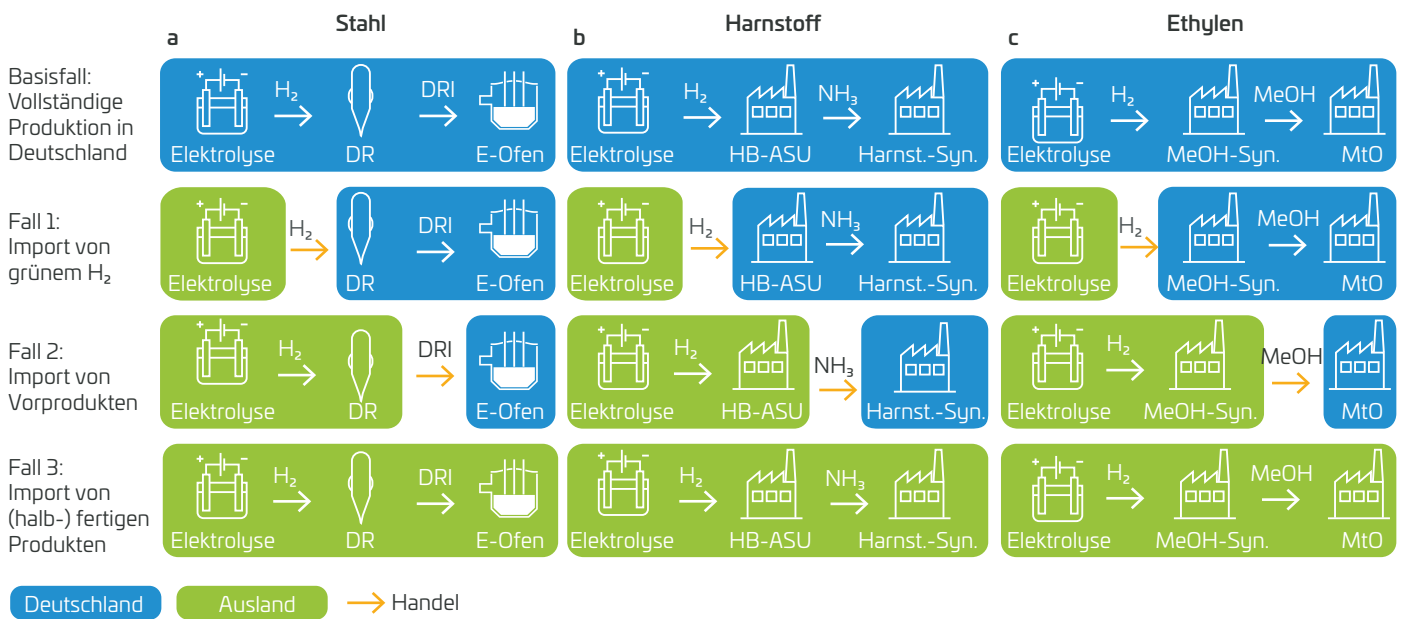


Abb. 2 | Produktionsschritte und resultierende Importoptionen. a Stahl, b Harnstoff, c Ethylen. Alle drei betrachteten Wertschöpfungsketten beginnen mit der Produktion von grünem Wasserstoff über Wasserelektrolyse. Der Wasserstoff (H₂) wird als Rohstoff zur Produktion von industriellen Vorprodukten verwendet: DRI (engl. direct reduced iron; dt. direkt reduziertes Eisen oder auch Eisenschwamm) aus der Direktreduktion (DR) von Eisenerz, Ammoniak (NH₃) aus der Haber-Bosch-Synthese mit Stickstoff aus einer Luftzerlegungsanlage (HB-ASU) und Methanol (MeOH) aus der Hydrierung von CO₂ aus Direct Air Capture. In den Wertschöpfungsketten werden diese Vorprodukte dann weiterverarbeitet zu Zwischenprodukten und (halb-)fertigen Produkten: warm gewalztes Blech aus einem Elektrolichtbogenofen (E-Ofen), Harnstoff aus der Synthese von Ammoniak und CO₂ und Ethylen aus dem Methanol-zu-Olefinen (MtO) Prozess. Handel kann zwischen diesen drei Produktionsstufen stattfinden, woraus sich vier Importfälle (Basisfall und Fälle 1–3) ergeben. Im Fall 2 der Stahlwertschöpfungskette wird DRI zu Hot Briquetted Iron (HBI) kompaktiert und somit leicht transportierbar gemacht. Diese Abbildung wurde lizenziert unter der Creative Commons Attribution 4.0 International Lizenz. Die Abbildung wurde zuerst veröffentlicht in: P.C. Verpoort u. a. (2024): Impact of global heterogeneity of renewable energy supply on heavy industrial production and green value chains. Nat Energy 9, 491–503. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01492-z>

sich auf aufkommende globale grüne Produktmärkte verlässt, dann gefährdet das nicht nur deutsche Klimaziele und die Transformation, sondern auch die Industrieführerschaft Deutschlands in diesen Zukunftsmärkten. Zukünftig sollten heimische Transformationsprojekte in Deutschland auch weiterhin erwägt, aber durch die Option von Importen grüner Vorprodukte ergänzt werden.

„Die im Bau befindlichen Anlagen sollten fertiggestellt und genutzt werden.“

Wichtig ist allerdings, dass sich Mengengerüste für die Wasserstoffwirtschaft an realistischen Zielbildern für die Grundstoffindustrie orientieren. Die Stahlindustrie als Ankerkunde für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft ist sinnvoll. Plant man jedoch alle Standorte vollständig mit Wasserstoff zu transformieren, wäre die resultierende Infrastruktur wahrscheinlich überdimensioniert. Das könnte zu Fehlinvestitionen und Risiken für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft führen.

Insgesamt braucht es eine neue Strategie, um die Option des Imports grüner Vorprodukte in einer kohärenten deutschen und europäischen Klima-, Industrie-, Handels-, Außen- und Sicherheitspolitik zu verankern. Konkret könnte die deutsche Importstrategie um grünes DRI erweitert werden und realistischere Zielbilder für den Import von molekularem Wasserstoff für die stoffliche Nutzung in der Grundstoffindustrie anvisieren. Fragen zu Transformation, Infrastruktur und Handel sollten europäisch koordiniert werden, um die Potenziale innerhalb Europas voll auszuschöpfen.

Für weitere Details, Hintergründe und Annahmen der Studie verweisen wir Sie auf:

- P.C. Verpoort u. a. (2024): Transformation der energieintensiven Industrie. Wettbewerbsfähigkeit durch strukturelle Anpassung und grüne Importe. Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam. <https://ariadneprojekt.de/publikation/report-transformation-der-energieintensiven-industrie/>

- P.C. Verpoort u. a. (2024): Impact of global heterogeneity of renewable energy supply on heavy industrial production and green value chains. Nat Energy 9, 491–503. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01492-z> ✓



© Dr. Philipp C. Verpoort

Dr. Philipp C. Verpoort
 Wissenschaftler
 Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) e.V.
 philipp.verpoort@pik-potsdam.de