



WASSERSTOFF
KOMPASS



INDUSTRIEZWEIGE

Stahlindustrie





WASSERSTOFF KOMPASS

ÜBERGREIFENDE ASPEKTE

- Regulatorischer Rahmen
- Zielgerichteter H₂-Einsatz
- Fachkräftesicherung
- Akzeptanz und Sicherheit
- Klima und Ressourcen

BEREITSTELLUNG

- H₂-Erzeugung
- H₂-Import
- Infrastruktur

INDUSTRIEZWEIGE

- Stahlindustrie**
- Chemische Industrie
- Raffinerien
- Zementindustrie
- Glasindustrie

MOBILITÄT UND TRANSPORT

- Kraftfahrzeuge
- Schifffahrt
- Luftverkehr
- Schienenverkehr

ENERGIEVERSORGUNG

- Gebäudewärme
- Prozesswärme
- Stromsystem

GLOSSAR

1 Generelle Aspekte der Stahlindustrie

- Technologie für morgen: wasserstoffbasierte Eisendirektreduktion
- Wege zur Treibhausgas-minderung in der Stahlindustrie
- Ökonomische Aspekte
- Versorgungssicherheit
- Endenergiebedarf
- Treibhausgasemissionen
- Wasserstoffbedarfe

6 Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- Wasserstoff-Anlieferung
- Wasserstoff-Produktion vor Ort
- Wasserstoff-Einblasen in den Hochofen
- Wasserstoff-Direktreduktionsanlagen (H₂-DRI)
- Integration in ein bestehendes Werk
- Recycling und E-Stahl
- Begleitforschung

8 Handlungsoptionen (Wasserstoff)

- Einblasen von Wasserstoff in den Hochofen
- Umstellung der Hochofenroute auf Eisendirektreduktion

18 Handlungsoptionen (andere Technologien)

- Elektrostahl

22 Literatur

Stahl

- › In der für die deutsche Volkswirtschaft wichtigen Stahlbranche entfallen etwa 70 Prozent der Produktion auf Primärstahl aus dem Hochofen und etwa 30 Prozent auf recycelten Elektrostahl.
- › Zur kurzfristigen Verringerung der CO₂-Emissionen könnte Einblasen von Wasserstoff im Hochofen die Einblaskohle ersetzen. Dabei könnte allerdings nicht auf den Einsatz von Kokskohle verzichtet werden, der weiterhin zu CO₂-Emissionen führen würde.
- › Zur vollständigen Defossilisierung der Stahlherstellung ist daher eine Umstellung der Primärstahlproduktion auf wasserstoffbasierte Eisendirektreduktion notwendig. Hier ergibt sich ein sehr großes spezifisches Treibhausgaseinsparpotenzial (bis zu 28 Tonnen CO₂ pro Tonne H₂).

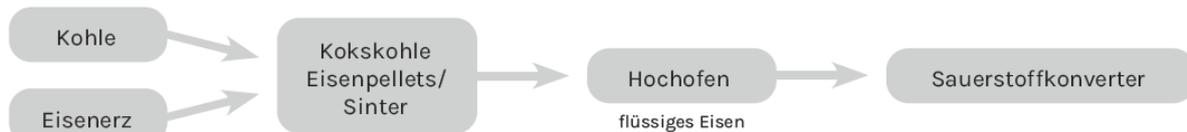
Generelle Aspekte der Stahlindustrie

In Deutschland werden jährlich etwa 40 bis 42 Millionen Tonnen Rohstahl produziert, auf unterschiedlichen Wegen. Hierbei wird allgemein zwischen Primär- und Sekundärstahl unterschieden. Die weltweit häufigste Variante (neunzig Prozent) der Primärstahlproduktion ist die Hochofenroute, um Eisenerze mit Kohle zu reduzieren und aufzuschmelzen. Das hierbei entstehende Roheisen wird dann zu Rohstahl weiter verarbeitet.

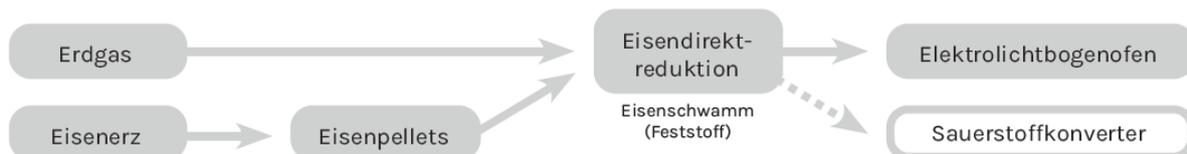
Technologie für morgen: wasserstoffbasierte Eisendirektreduktion

Nur etwa zehn Prozent des weltweit hergestellten Primärstahls basiert derzeit auf Eisendirektreduktion (direct reduction of iron, DRI) mithilfe von Erdgas.^[10] Hierbei entsteht metallisches Eisen ohne Aufschmelzen, der sogenannte Eisenschwamm. Dieser muss dann noch geschmolzen werden, etwa im Elektrolichtbogenofen (electric arc furnace, EAF) oder Sauerstoffkonverter (basic oxygen furnace, BOF). Bei Sekundärstahl handelt es sich um recyceltes Material, das normalerweise im EAF aufgeschmolzen wird.

Hochofenroute (~90% der heutigen globalen Primärstahlproduktion)



Eisendirektreduktion (~10% der heutigen globalen Primärstahlproduktion)



Wege zur Treibhausgasminderung in der Stahlindustrie

Etwa 70 Prozent der jährlich in Deutschland produzierten 40 bis 42 Millionen Tonnen Rohstahl sind Primärstahl aus dem Hochofen und etwa 30 Prozent Sekundärstahl aus dem Elektrolichtbogenofen.^[17] Eisendirektreduktion (derzeit auf Erdgasbasis) wird nur an einem Standort in Deutschland durchgeführt.^[20]

Zur Minderung der Treibhausgasemissionen müssen der Kohleeinsatz in den Hochöfen und der damit verbundene CO₂-Ausstoß reduziert werden. Durch CO₂-Abscheidung können Emissionen in der bestehenden Hochofenroute reduziert werden. Um die Klimaneutralitätsziele zu erreichen, sind allerdings weitreichendere Änderungen der bestehenden Primärstahlproduktion nötig. Hierfür kommen übergangsweise weniger klimaschädliches Erdgas oder perspektivisch auch synthetisches Methan sowie Wasserstoff infrage. Dies wird dazu führen, dass die bestehenden Prozesse der Stahlproduktion umgestellt werden müssen.



Ökonomische Aspekte

Deutschland ist der größte Stahlproduktionsstandort der Europäischen Union mit etwa 83.000 Beschäftigten. In den stahlverarbeitenden Branchen, wie etwa der Automobilindustrie, arbeiten bis zu 4,3 Millionen Menschen.^[17] Der Umsatz der Stahlbranche betrug im Jahr 2021 41,4 Milliarden Euro.^[18] Eine immer wieder diskutierte Abwanderung der stahlproduzierenden Unternehmen, beispielsweise aufgrund hoher Energiekosten, könnte demnach deutliche Folgen für die deutsche Wirtschaft und den Arbeitsmarkt nach sich ziehen.

Kosten für die Umstellung der Primärstahlroute auf CO₂-arme Verfahren werden in Studien auf circa 10 Milliarden Euro (bis 2030) beziehungsweise 30 Milliarden Euro (bis 2050) geschätzt.^[1]

Versorgungssicherheit

Stahl ist ein wichtiger, vielseitig einsetzbarer Werkstoff. Er wird für Gebäude (zum Beispiel Stahlbeton), Verkehrsmittel (zum Beispiel Kraftfahrzeuge) sowie für technische Anlagen (zum Beispiel Windkraftanlagen) benötigt. Die Verfügbarkeit heimischen Stahls begrenzt potenziell kritische Importabhängigkeiten.

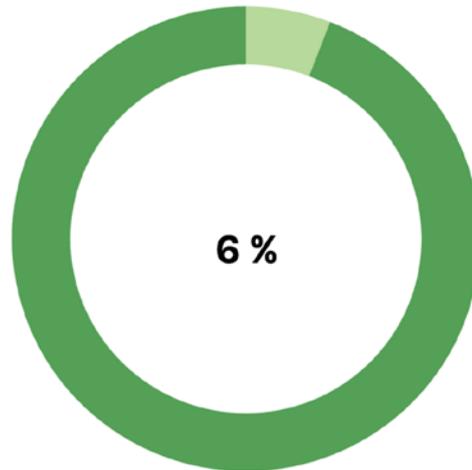
Um Stahl mit Wasserstoff produzieren zu können, wird viel H₂ benötigt, der anderen Sektoren nicht mehr zu Verfügung stünde. Besonders zu Beginn des Markthochlaufs bei möglicherweise schwankender Verfügbarkeit von Wasserstoff kann diese Nutzungskonkurrenz zwischen Anwendungen Auswirkungen auf den wirtschaftlichen Betrieb haben.

Aktuell produzieren Stahlwerke mit den Gichtgasen aus dem Hochofen Strom und versorgen sich damit selbst. Bei einer Umstellung der Produktion auf Eisendirektreduktion entfällt dieser selbst produzierte Strom. Dadurch könnte sich der Strombedarf für das Werk verdoppeln.^[21]

Endenergiebedarf

Für die Produktion und Verarbeitung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen wurden 146 Terawattstunden im Jahr 2019 benötigt.^[3]

Anteil der Verarbeitung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen am gesamten Endenergiebedarf Deutschlands im Jahr 2019 in Terawattstunden^{[3][22]}



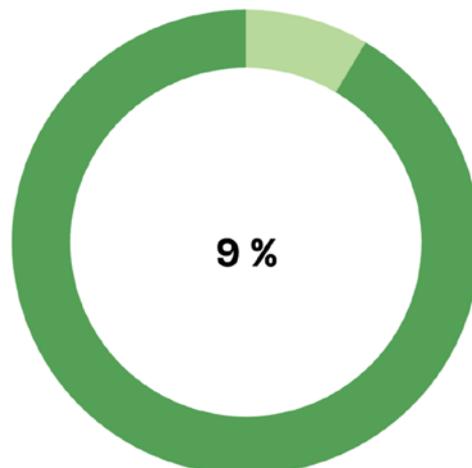
■ Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen
 ■ restlicher Endenergieverbrauch

Treibhausgasemissionen

Je nach Quelle werden die jährlichen Treibhausgasemissionen der deutschen Stahlindustrie mit 53 Millionen Tonnen CO₂^[17], 60 Millionen Tonnen CO₂^[1] oder 70 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente^[3] angegeben. Die letzte Angabe beinhaltet neben Emissionen bei der Produktion von Roheisen und Stahl auch die Emissionen, die bei der Herstellung von Ferrolegierungen entstehen. Dadurch ergeben sich etwa 1,5 Tonnen CO₂ pro Tonne Stahl.

THG-Emissionen in Millionen Tonnen

durch die Produktion von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen^[3] im Vergleich zu den restlichen Emissionen aus dem Jahr 2020^[22]



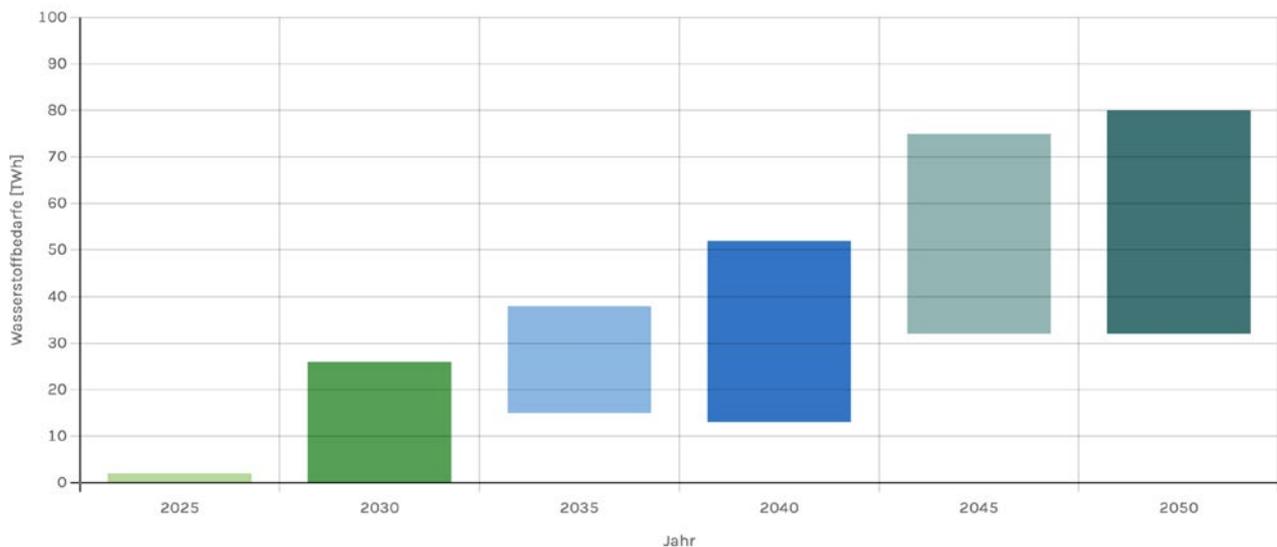
■ Emissionen der Herstellung von Eisen, Stahl und Ferrolegierungen
 ■ restl. Emissionen

Eine Zukunftstechnologie, um die Stahlindustrie zu defossilisieren, ist die Eisendirektreduktion mit Wasserstoff. Ausschlaggebend kann hier aktuell der deutsche Strommix sein. Dieser sorgte im Jahr 2021 für 420 Gramm CO₂ pro Kilowattstunde Strom.^[23] In Zukunft können Emissionen aus der Stromgewinnung entfallen, wenn erneuerbarer Strom eingesetzt wird.

Wasserstoffbedarfe

Aus Studien lässt sich ein Wasserstoffbedarf von bis zu achtzig Terawattstunden für die gesamte Umstellung der Stahlbranche bis 2045/2050 ableiten.^{[3][6][9][11][13][15][17][34][35][36]} Davon entfällt etwa die Hälfte auf Prozesswärme.

Wasserstoffbedarfe für die Umstellung der Stahlindustrie
aus Studien in Terawattstunden^{[3][6][9][11][13][15][17][34][35][36]}



AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

- > H₂-Stahl erforscht den Wasserstoffeinsatz in der Stahlproduktion
<https://www.energiesystem-forschung.de/forschen/projekte/reallabor-der-energie-wende-h2-stahl>
- > Im Projekt Carbon2Chem wird die Weiternutzung des Gichtgases untersucht
<https://www.thyssenkrupp.com/de/carbon2chem>

PUBLIKATION

- > Wasserstoff-Kompass (2022): Wasserstoff im Stahlsektor
https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Fact_sheet_Stahl.pdf



Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Wasserstoff-Anlieferung

Rund um die Versorgung mit Wasserstoff ergeben sich Fragestellungen, etwa zur benötigten Qualität und wie diese sichergestellt werden kann, aber auch zur Infrastrukturanbindung. Zusätzlich werden bei unsicherer Versorgungslage auch lokale Speichermöglichkeiten benötigt.

Wasserstoff-Produktion vor Ort

Erfolgt die Wasserstofferzeugung auf dem Werksgelände selbst, ergeben sich Fragen rund um die Systemintegration, zum Beispiel zur Bereitstellung von erneuerbarem Strom, zu Betriebsweisen von Elektrolyseuren, zur Sicherheit, Energie- und Wasserstoff-Speicherung sowie zur bereitgestellten Reinheit.

Wasserstoff-Einblasen in den Hochofen

- › Eine wesentliche Fragestellung rund um den Ersatz von Einblaskohle in den Hochöfen durch Wasserstoff sind die Behandlung der Gichtgase und die etwaige Rückgewinnung von Wasserstoff.
- › Interessant ist auch, ob auf schwankende Verfügbarkeit von Wasserstoff mit variablen Einblasmengen reagiert werden könnte.
- › Bei allen Anwendungen von Wasserstoff sollten außerdem die Materialverträglichkeit und das Versprödungsrisiko untersucht werden.

Wasserstoff-Direktreduktionsanlagen (H₂-DRI)

- › Generelle Fragen bestehen noch zur Hochskalierung von Anlagen auf Wasserstoffbasis, etwa zu Zuleitungen, Komponenten, Fahrweisen und Monitoringkonzepten.
- › Neben der Wasserstoffverträglichkeit aller Materialien und Komponenten stellt auch die Sensorik und Detektion eventueller Leckagen eine zukünftige Fragestellung bei der Eisendirektreduktion dar.
- › Modelle und Simulationen könnten späteres Prozessmonitoring verbessern.
- › Wichtig ist auch, die Nutzung verschiedener Ausgangsstoffe beziehungsweise verschiedener Erzqualitäten zu erproben.
- › Kohlenstoff spielt eine wesentliche Rolle in Stahllegierungen und ein gewisser Anteil wird durch die Verwendung von Kohle oder Erdgas in den Stahl eingebracht. Woher der Kohlenstoffanteil im Stahl zukünftig bei der Nutzung von Wasserstoff stammt, ist noch eine grundsätzliche FuE-Fragestellung.

Integration in ein bestehendes Werk

Der kontinuierliche Umbau einzelner Einblasen von Wasserstoff in den Hochöfen beziehungsweise der Ersatz durch DRI verändert das Gesamtsystem.

- › Zum Beispiel könnte sich die Zusammensetzung der Gichtgase verändern und damit ihre Weiternutzung, etwa zur Strombereitstellung, behindern.
- › Prozessmonitoring und Anlagenüberwachung müssten im Hinblick auf Wasserstoff angepasst werden.
- › Die Kopplung von DRI an vorhandene Sauerstoffkonverter (basic oxygen furnace, BOF), in welchen aus Roheisen Rohstahl erzeugt wird, sollte untersucht werden. Neue Anlagen, wie etwa Schlackewiderstandsöfen (submerged arc furnace, SAF), kämen hierzu infrage.

Recycling und E-Stahl

Interessante Fragestellungen zu E-Stahl und Recycling ergeben sich rund um das Thema Qualität.

- › Hierbei stellen etwa Sortierungen nach Schrottqualität oder Nebenelementen im Stahl Forschungsfragen dar.
- › Auch Konzepte, um die Verfügbarkeit von hochwertigen Schrotten zu erhöhen, müssen weiterentwickelt werden.

Begleitforschung

Neben den hier genannten Forschungsbedarfen könnten weitere Fragestellungen aufkommen, etwa zu sozialer Akzeptanz und den Auswirkungen bei Abwanderung beziehungsweise Auslagerung von Teilschritten. Es besteht die Möglichkeit weiterführender ökonomischer und ökologischer Analysen.

Handlungsoptionen Wasserstoff

Einblasen von Wasserstoff in den Hochofen

Um den Kohlebedarf der Stahlproduktion zu reduzieren, könnte Wasserstoff über Düsen in den Hochofen eingeblasen werden. Dabei wird die sogenannte Einblaskohle durch Wasserstoff ersetzt.^[19] Die sogenannte Kokskohle, die mit dem Eisenerz in den Hochofen gefüllt wird, würde allerdings als Reduktionsmittel weiterhin benötigt.

STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG



› In unserer Stakeholderumfrage 2021^[24] rechneten über die Hälfte der Befragten mit einem großflächigen Einsatz von H₂ in der Eisen- und Stahlbranche bereits 2030 gegenüber nur zwei Prozent, die mit keinem frühen großflächigen Einsatz rechneten. Zu einer genauen Anwendung von H₂ in der Stahlbranche wurden die Stakeholder*innen nicht befragt.

Voraussetzungen

- › Wasserstoffimporte sind eine notwendige Voraussetzung für eine ausreichende Bereitstellung, da die prognostizierten Bedarfe an Wasserstoff die inländische Erzeugung signifikant übersteigen werden.
- › Infrastruktur für den Transport von Wasserstoff zum Werk und die Lagerung vor Ort ist notwendig für den Einsatz in Stahlwerken.

Vorteile

- › Bereits vorhandene Hochöfen können weiter genutzt werden. Dadurch muss der Lebenszyklus/Abschreibungszeitraum nicht vorzeitig beendet werden.
- › Einblaskohle und Wasserstoff lassen sich möglicherweise flexibel mischen. Dadurch kann auf Preisschwankungen und Verfügbarkeiten bei erneuerbarem Wasserstoff reagiert werden.

Nachteile

- › Kein Ersatz der 330 Kilogramm Kokskohle pro Tonne Roheisen^[19] als Reduktionsmittel möglich. Dadurch werden weiterhin Treibhausgase emittiert, wenn auch etwas weniger.
- › Es wird erwartet, dass ein Großteil des eingeblasenen Wasserstoffs tatsächlich unverbraucht über das Gichtgas abgeführt^[1] und damit anschließend verstromt wird. Dies ist ineffizient und bei den erwarteten hohen Preisen für erneuerbaren Wasserstoff vermutlich auch unwirtschaftlich.



Folgen

- › Durch das Einblasen von Wasserstoff in den Hochofen, könnten noch während dessen Lebensdauer die Treibhausgasemissionen signifikant reduziert werden.
- › Lock-in-Gefahr: Es kann dazu kommen, dass in der nächsten Zustellungsphase der bestehende Hochofen nicht durch eine Eisendirektreduktionsanlage ersetzt und somit der weiterhin auf fossilen Brennstoffen beruhende Produktionspfad für die nächsten 15 Jahre beschritten wird.

Ökonomische Aspekte

Eine Weiternutzung des Hochofens kann im Vergleich zu einer sofortigen Investition in eine Eisendirektreduktionsanlage ökonomisch sinnvoll sein, weil dessen Lebenszyklus nicht vorzeitig beendet werden muss. Entscheidend für diese Abwägung wird neben Investitionsförderung voraussichtlich der CO₂-Preis im EU ETS und die Menge an Gratis-Zertifikaten sein.

Versorgungssicherheit

Ein Einblasen von H₂ in den Hochofen würde weniger H₂ benötigen als andere Handlungsoptionen, wie beispielsweise die Umstellung auf H₂-basierte Eisendirektreduktion.

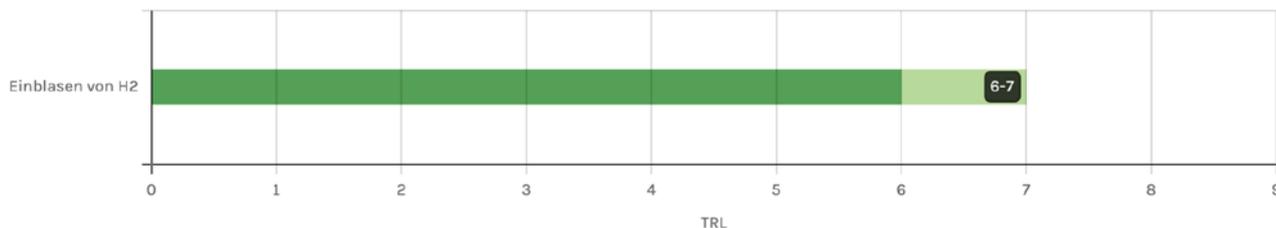
Akteur*innen

- › Stahlhersteller

Technologiereifegrad

Technologiereifegrad

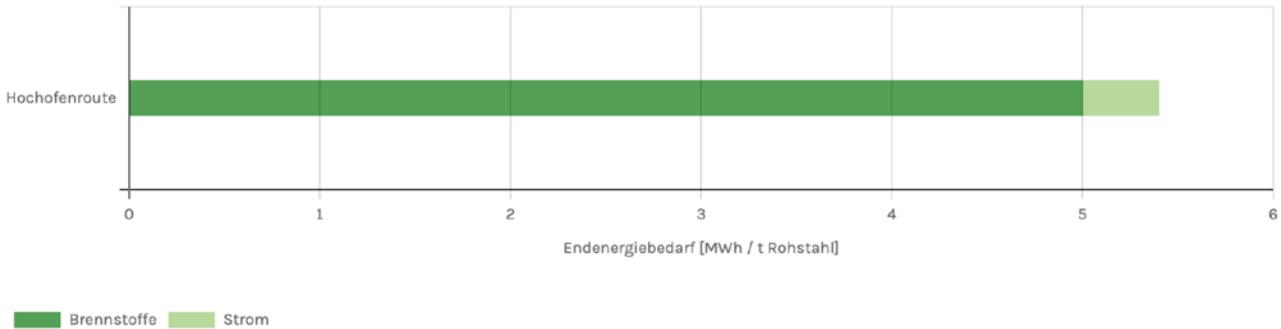
Seit 2019 werden dazu bei Thyssenkrupp Steel in Duisburg und am Forschungsinstitut der Stahlindustrie (BFI) Versuche, unter anderem im Umsetzungsprojekt H₂ Stahl, durchgeführt: Der Technologiereifegrad für das Einblasen von Wasserstoff in den Hochofen liegt bei 6 bis 7.^[1]



Endenergiebedarf

Für eine Tonne Stahl aus dem Hochofen werden im Schnitt etwa 5 Megawattstunden Brennstoffe und 0,4 Megawattstunden Strom benötigt.^[40]

Endenergiebedarf der Hochofenroute in Megawattstunden pro Tonne Rohstahl^[40]



Für eine durchschnittliche Produktion von 28 Millionen Tonnen Rohstahl aus den deutschen Hochöfen ergeben sich damit etwa 141 Terawattstunden Brennstoffbedarfe beziehungsweise 11 Terawattstunden Strombedarf. Der Strombedarf wird derzeit über Eigenstromerzeugung von etwa zwölf Terawattstunden aus der Verstromung von Gichtgasen gedeckt.^[40]

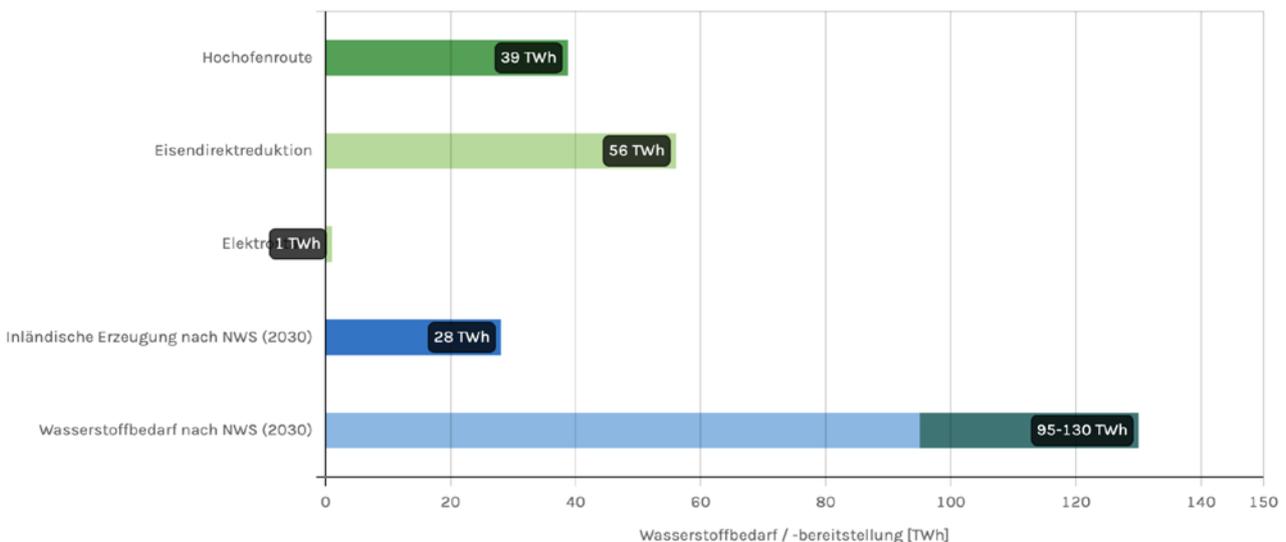
Wasserstoffbedarfe

Wasserstoff soll Einblaskohle im bestehenden Hochofen bei der Produktion von Roheisen ersetzen. Pro Tonne Roheisen werden dafür etwa 170 Kilogramm Einblaskohle genutzt.^[19] Dies entspräche in etwa dem Energiegehalt von 42 Kilogramm H₂, wenn die Gesamtmenge ersetzt würde. Würde diese Option in ganz Deutschland umgesetzt, so würden etwa 39 Terawattstunden beziehungsweise 1,2 Millionen Tonnen Wasserstoff nötig, um etwa 28 Millionen Tonnen Rohstahl zu produzieren.

Wasserstoffbedarf bei Einblasen von Wasserstoff in den Hochofen im Vergleich

mit der Elektrostahlproduktion, der Eisendirektreduktion und den politischen Erwartungen.

Unter der Annahme, dass für die gesamte deutsche Primärstahlproduktion (28 Millionen Tonnen) die Einblaskohle im Hochofen durch Wasserstoff ersetzt wird, werden etwa 39 Terawattstunden Wasserstoff (etwa 1,2 Millionen Tonnen) benötigt.



AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

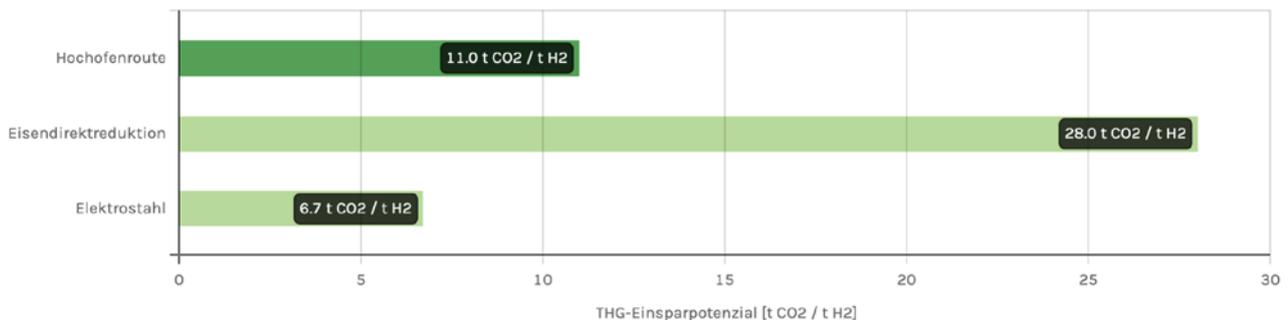
- > H₂-Stahl
<https://www.energiesystem-forschung.de/forschen/projekte/reallabor-der-energiewende-h2-stahl>
- > Carbon2Chem
<https://www.thyssenkrupp.com/de/carbon2chem>
- > H₂BF
<https://www.bfi.de/de/projekte/h2bf-co2-minderung-durch-h2-injektion-in-den-hochofen-projektphase-1/>

Minderungspotential

Durch das Einblasen von erneuerbarem Wasserstoff in den Hochofen soll bis zu zwanzig Prozent weniger CO₂ emittiert werden.^[22] Das entspräche dann einer Einsparung von etwa 8 bis 11 Tonnen CO₂ pro Tonne Wasserstoff.

Treibhausgas-Einsparpotenzial

in Tonnen CO₂ pro Tonne H₂. Durch die Nutzung von Wasserstoff zum Einblasen in den Hochofen lassen sich bis zu 11 Tonnen CO₂ pro Tonne H₂ einsparen.^[22]



MASSNAHME

MASSNAHME

> Scope-3-Emissionsziele für die Stahlindustrie

Um das Setzen von Scope-3-Emissionszielen bei Unternehmen anzureizen, könnte die Berichterstattung über Scope-3-Emissionen^[28] verbindlich sein. So könnte sich die Wahrscheinlichkeit des Einblasens von H₂ in Hochöfen, zumindest kurzfristig vor dem Ergreifen effektiverer Maßnahmen zur Treibhausgasminderung, steigern. Denn wenn Unternehmen in der stahlverarbeitenden Industrie und weitere Unternehmen entlang von stahlbasierten Wertschöpfungsketten, wie Autohersteller, sich ambitionierte Scope-3-Emissionsziele setzen, würden diese Unternehmen Druck auf ihre jeweilige Zulieferindustrie (hier die Stahlherstellung) ausüben, um die einhergehenden Emissionen zu reduzieren.^[30]

INITIATOR

- > Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz



Umstellung der Hochofenroute auf Eisendirektreduktion

Bei der Direktreduktion von Eisen werden in der Regel Eisenerzpellets mit einem wasserstoffreichen Synthesegas reduziert. Dieses kann aus Erd- oder Gichtgas reformiert werden. Der Prozess führt nicht zum Aufschmelzen und das Produkt ist ein Feststoff (sogenannter Eisenschwamm).

In Zukunft soll reiner Wasserstoff in neuen Direktreduktionsanlagen Verwendung finden. Übergangsweise kann mit höheren Wasserstoffgehalten im Synthesegas gearbeitet werden. Auch Biomethan kann hierfür in Betracht gezogen werden, wobei dessen Verfügbarkeit limitiert ist.

Nach der Roheisenproduktion kann der Eisenschwamm entweder über den Elektrolichtbogenofen (electric arc furnace, EAF) zu Elektro Stahl oder über die Öfen der Hochofenroute (basic oxygen furnace, BOF und submerged arc furnace SAF) weiterverarbeitet werden.

STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG



› In unserer Stakeholderumfrage 2021^[24] rechneten 90 Prozent der Befragten mit einem großflächigen Einsatz von H₂ in der Eisen- und Stahlbranche bis spätestens 2040 gegenüber nur 2 Prozent, die mit keinem frühen großflächigen Einsatz rechneten. Zu der genauen Anwendung von H₂ in der Stahlbranche wurden die Stakeholder*innen nicht befragt.

Voraussetzungen

- › Infrastruktur für den Transport von Wasserstoff zum Werk und die Lagerung vor Ort ist notwendig für den Einsatz von Wasserstoff.
- › Importe sind notwendig für eine ausreichende H₂-Bereitstellung, da die prognostizierten Bedarfe die inländische Erzeugung voraussichtlich übersteigen werden.

Vorteile

- › Durch den Ersatz des kohlenutzenden Hochofens ist eine klimaneutrale Roheisenproduktion möglich.

Nachteile

- › Umstellung der hochofenbasierten Stahlproduktion auf Eisendirektreduktion ist sehr investitionsintensiv.

Folgen

- › Arbeitsplätze werden in Deutschland gehalten, wenn weiterhin Primärstahl hier produziert wird.
- › Wasserstoff könnte auch an anderen Standorten in der Welt zur Eisendirektreduktion verwendet werden und der Eisenschwamm könnte dann nach Deutschland importiert und weiterverarbeitet werden. Dann wäre ein weiterer Prozessschritt für den Transport nach Deutschland nötig: die Verarbeitung zu Briketts (hot briquetted iron; HBI). Bei diesen stellt sich die Frage, wie die Verarbeitung verschiedener HBI-Qualitäten von verschiedenen Standorten in Folgeprozessen zu gestalten ist. Bei einer Verlagerung der Roheisenproduktion ins Ausland entfällt Wertschöpfung in Deutschland.
- › Eine längerfristige Weiternutzung von Synthesegas aus Erdgas im Übergang ist möglich.
- › Durch den Kohleausstieg und die Defossilisierung der Stahlindustrie würden Hüttensand und Flugasche, die derzeit als Zuschläge im Zement eingesetzt werden, wegfallen und müssten durch andere Materialien ersetzt werden.

Ökonomische Aspekte

- › Die Umstellung der Primärstahlroute in Deutschland erfordert hohe Investitionen in relativ kurzen Zeiträumen. Laufende Abschreibungszeiträume und Lebenszyklen müssen eventuell vorzeitig beendet werden.
- › Durch den Angriffskrieg Russlands erhöhte Gaspreise könnten die Umstellung auf DRI kostenmäßig gefährden, da Synthesegas aus Erdgas eventuell übergangsweise in verschiedenen Mischverhältnissen mit Wasserstoff zum Einsatz kommen kann.
- › Es wird mit einem Gesamtpreis von etwa siebenhundert Euro pro Tonne Stahl gerechnet. Zum Vergleich: Konventioneller Rohstahl aus der Hochofenroute kostet etwa 390 bis 450 Euro pro Tonne. Das bedeutet, dass der Preis pro Tonne Stahl im Durchschnitt um etwa 280 Euro steigen wird (Annahme: 70 Kilogramm Bedarf an H₂ à 4 Euro pro Kilogramm^[1]).

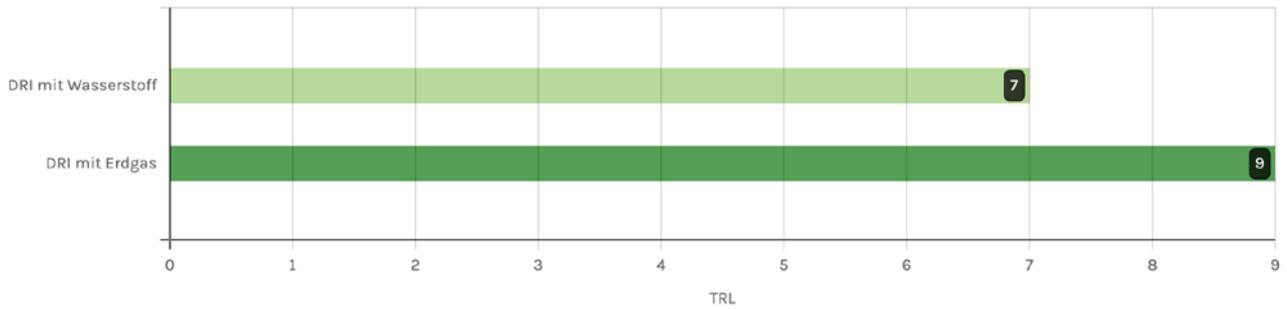
Versorgungssicherheit

Die Verfügbarkeit heimischen Stahls kann zur Versorgungssicherheit stahlintensiver Branchen beitragen. Der breite Einsatz von Wasserstoff zur Eisendirektreduktion erfordert große Mengen, die anderen Sektoren und der Anwendung dann eventuell nicht zur Verfügung stehen können.

Technologiereifegrad

Technologiereifegrad

Eisendirektreduktionsanlagen, die Erdgas als Reduktionsmittel verwenden, befinden sich bereits im großskaligen Einsatz.^[1]



Akteur*innen

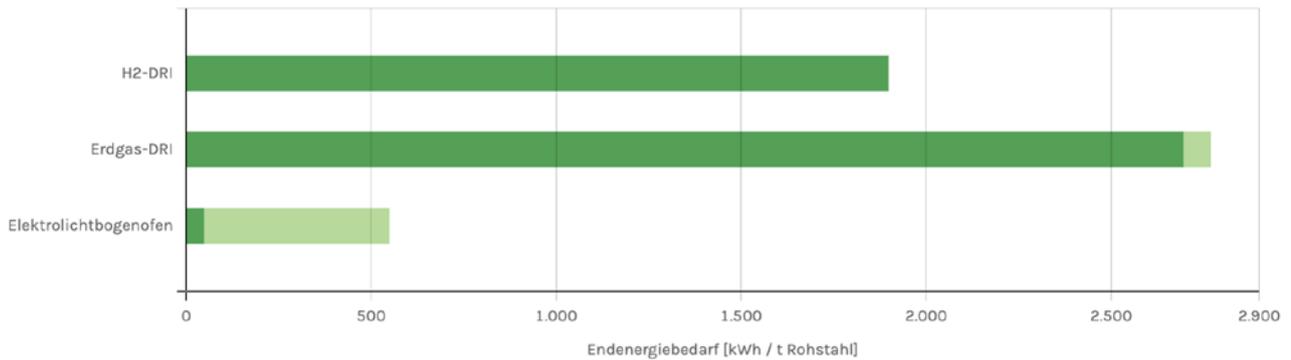
> Stahlhersteller

Endenergiebedarf

Der Endenergiebedarf der Eisendirektreduktion ist abhängig vom genutzten Reduktionsmittel. Zusätzlich entstehen Bedarfe durch das Aufschmelzen, beispielsweise im Elektrolichtbogenofen.

Endenergiebedarf der Eisendirektreduktion

und des Aufschmelzens im Elektrolichtbogenofen in Kilowattstunden pro Tonne Rohstahl^[40]



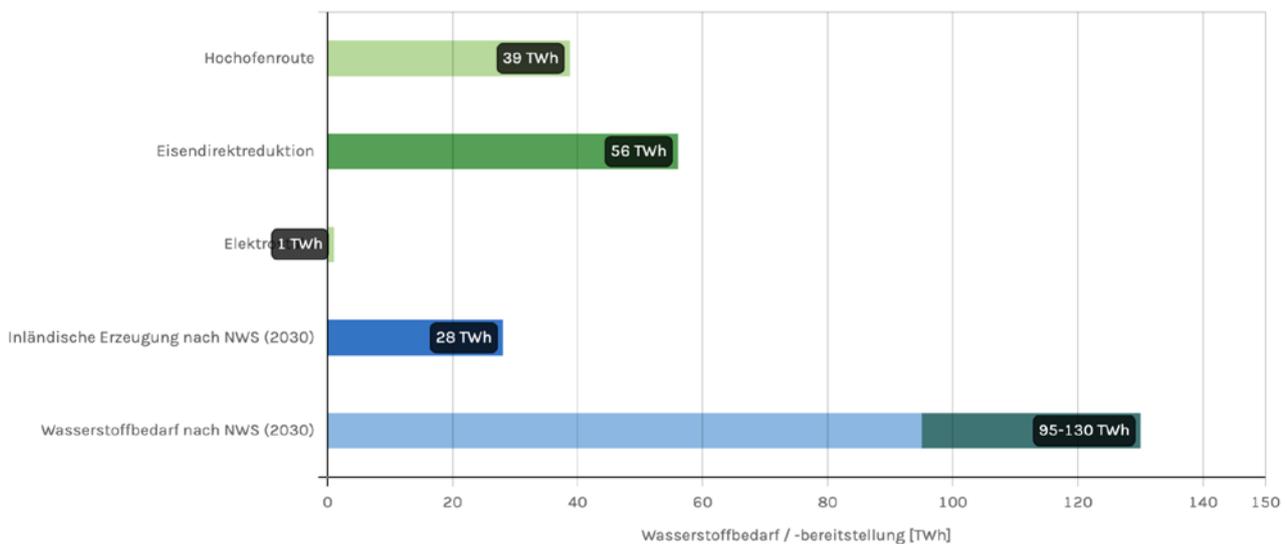
Wasserstoffbedarfe

Der Wasserstoffbedarf für die Umstellung der Primärproduktion auf Eisendirektreduktion wird in der Literatur auf etwa 45 bis 56 Terawattstunden geschätzt.^{[1][3][6][9][13][15][17][34][35][36]}

Wenn Wasserstoff zur Wärmebereitstellung in Folgeprozessen verwendet wird, dann kann sich der Bedarf in etwa verdoppeln.

Wasserstoffbedarf für die Eisendirektreduktion in Deutschlands bis 2045 in Terawattstunden

Im Vergleich mit dem Einblasen von Wasserstoff in den Hochofen, der Elektrostahlherstellung und den politischen Erwartungen.



AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

> H₂-Stahl

<https://www.energiesystem-forschung.de/forschen/projekte/reallabor-der-energie-wende-h2-stahl>

> WindH₂

<https://salcos.salzgitter-ag.com/de/windh2.html>

> GrInHy2.0

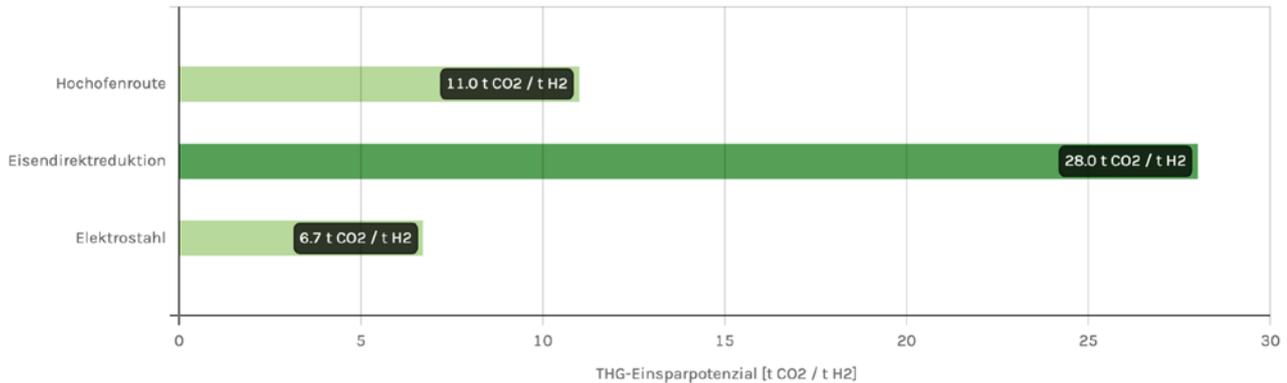
<https://salcos.salzgitter-ag.com/de/grinhy-20.html>

Minderungspotential

Allgemein wird mit mehr als 25 Kilogramm CO₂ pro Kilogramm H₂^[1] beziehungsweise 28 Tonnen CO₂ pro Tonne H₂^[17] gerechnet. Hier könnte auch Wasserstoff in Folgeprozessen und für die Bereitstellung von Prozesswärme "»Prozesswärme inkludiert worden sein.

Treibhausgas-Einsparpotenzial

in Tonnen CO₂ pro Tonne H₂. Durch die Nutzung von Wasserstoff zur Eisendirektreduktion lassen sich bis zu 28 Tonnen CO₂ pro Tonne H₂ einsparen.^{[1][17]}



MASSNAHMEN

MASSNAHME

> Förderung der Umstellung eines Hochofens auf DRI durch CCfD

Klimaschutzverträge (Carbon Contracts for Differences, CCfD) könnten den Einsatz von Wasserstoff im Stahlsektor anreizen. Bei CCfD würden Mehrkosten für den Betrieb von emissionsarmen Technologien gedeckt, wenn diese trotz des CO₂-Preises gegenüber konventionellen Technologien noch nicht wettbewerbsfähig sind.^[25] Dadurch kann für Technologien, die bei einem höheren CO₂-Preis sicher wettbewerbsfähig sein werden, Investitionssicherheit geschaffen werden.^[26] Mehr zur Steigerung der Nachfrage nach Wasserstoff.

INITIATOR

> Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

MASSNAHME

> Quoten für grünen Stahl

Quoten für den Einsatz von grünem Stahl, die sich sukzessive steigern, könnten für einen längeren Zeitraum angelegt werden. Diese könnten für die Autoindustrie und weitere Grundstoffbranchen gelten.^[27] Quoten im öffentlichen Sektor könnten Teil von nachhaltigen Beschaffungsrichtlinien (siehe Maßnahme weiter unten) sein. Mehr zur Steigerung der Nachfrage nach Wasserstoff.

INITIATOR

> Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz



MASSNAHME

> Scope-3-Emissionsziele für die Stahlindustrie

Um das Setzen von Scope-3-Emissionszielen bei Unternehmen anzureizen, könnte die Berichterstattung über Scope-3-Emissionen^[28] verbindlich sein. So stiege die Wahrscheinlichkeit des Umstiegs auf Eisendirektreduktion, wenn sich Unternehmen in der stahlverarbeitenden Industrie und anderen Bereichen (etwa Autohersteller) entlang von stahlbasierten Wertschöpfungsketten ambitionierte Scope-2-Emissionsziele setzen. Denn diese Unternehmen würden Druck auf ihre jeweilige Zulieferindustrie (hier Stahlherstellung) ausüben, um die einhergehenden Emissionen zu reduzieren.^[30]

INITIATOR

> Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

MASSNAHME

> Zertifizierung von Wasserstoff

Um erneuerbaren Wasserstoff in der Stahlbranche einsetzen zu können, wird voraussichtlich auch auf importierten Wasserstoff zurückgegriffen werden müssen. Für langfristige Wasserstoffabnahmeverpflichtungen mit außereuropäischen Lieferanten ist ein Zertifizierungssystem für erneuerbaren Wasserstoff unabdingbar.

INITIATOR

- > Bundesregierung, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
- > Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
- > Auswärtiges Amt

MASSNAHME

> Zusammen mit Stakeholder*innen an Einführung eines Label-Systems für Produkte mit nachhaltigem Stahl arbeiten

Ein Label-System für Produkte, die mithilfe von Wasserstoff oder seinen Derivaten produziert oder (teilweise) dekarbonisiert wurden, könnte zum Verständnis der Rolle von Wasserstoff sowie seinen Derivaten bei möglichen Kund*innen und der interessierten Öffentlichkeit beitragen. Ebenso können Labels transparent die Preisunterschiede zwischen etablierten und noch nicht etablierten Produktionstechnologien beziehungsweise -prozessen aufzeigen.^[31] Mehr zum Thema Wasserstoffakzeptanz befindet sich unter Akzeptanz und Sicherheit.

STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG



- > Einige Stakeholder*innen hielten eine gut sichtbare Kennzeichnung von Wasserstoff oder Derivaten beziehungsweise Produkte, die diese enthalten, für eine wichtige Maßnahme zur Steigerung der Akzeptabilität von Wasserstoff. Jedoch äußerten sich zu wenig Stakeholder*innen zu diesen Vorschlägen, um einen Konsens festhalten zu können.



INITIATOR

- › Bundesregierung, vor allem Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen

MASSNAHME

› Nutzung von nachhaltigem Stahl bei Vergaben der öffentlichen Hand

Durch ein nachhaltiges öffentliches Beschaffungswesen können erzeugende Unternehmen mit einer gesicherten Nachfrage rechnen. Diese trägt zur Etablierung erster Märkte für mithilfe von Wasserstoff hergestellte Produkte bei.^[31] Für die Steigerung der Nachfrage nach grünem Stahl spielt der öffentliche Bausektor eine besondere Rolle. Nach dem Wirtschaftsbau (42 Prozent der Umsätze im Bausektor 2018) ist der öffentliche Bausektor mit 34 Prozent der Umsätze (2018) einer der Hauptstahlabnehmer.^[32] Siehe auch Regulatorischer Rahmen.

INITIATOR

- › Beschaffungswesen der öffentlichen Hand
- › Bundesministerium der Finanzen

Handlungsoptionen Andere Technologien

Elektrostahl

Elektrostahl wird in Elektrolichtbogenöfen (EAF) hergestellt. Sie nutzen elektrische Energie zum Aufschmelzen des Einsatzgutes. Da es sich hierbei aktuell um einen Recyclingprozess handelt, wird auch von Recycling- oder Sekundärstahl gesprochen. In Zukunft könnten auch Eisenpellets aus Direktreduktion aufgeschmolzen werden. Wenn dabei ausschließlich erneuerbarer Strom eingesetzt wird, erfolgt der Produktionsprozess annähernd ohne Treibhausgasemissionen.

Voraussetzungen

- › Eine Ausweitung der Produktion erfordert höhere Recyclingraten von qualitativ hochwertigem Stahl oder den großflächigen Import von direkt reduziertem Eisen als Brikett.
- › Für den klimaneutralen Betrieb des Elektrolichtofenbogens muss erneuerbarer Strom vorhanden sein.



Vorteile

- › Es handelt sich bei der Elektrostahlherstellung um einen etablierten Prozess, der adaptiert werden kann, etwa bei der Nutzung von Wasserstoff zur Wärmebereitstellung.
- › Da die CO₂-intensive Herstellung von Roheisen beziehungsweise Rohstahl bereits abgeschlossen ist, ist das Wiederaufschmelzen im Elektrolichtbogenofen mit erneuerbarem Strom mit geringeren Treibhausgasemissionen verbunden.

Nachteile

- › Aktuell ist die Qualität von Recyclingstahl wegen der unterschiedlichen Stahlschrottqualitäten und -legierungen, die dabei genutzt werden, nicht so hoch wie von Primärstahl aus der Hochofenroute.

Folgen

- › Die gesamte deutsche Primärstahlproduktion kann nicht alleine durch Recyclingstahl ersetzt werden. Eine Umstellung auf Elektrostahl mit (importierten) Eisenpellets ist voraussichtlich nicht kurzfristig möglich.
- › Die hohe Stromnachfrage im Falle eines breiten Einsatzes könnte den Preis anderer Stromkund*innen erhöhen.
- › Bei einem Umstieg auf Elektrostahl würden Hüttensand und Flugasche, die derzeit als Zuschläge im Zement eingesetzt werden, wegfallen und müssten durch andere Materialien ersetzt werden.
- › Der Umgang mit unterschiedlichen Qualitäten von Eisenerz, Schrotten und HBI (hot briquetted iron) aus der Eisendirektreduktion könnte herausfordernd sein.

Ökonomische Aspekte

Die Wirtschaftlichkeit eines Elektrostahlwerk ist stark strompreisabhängig. Als Folge des russischen Angriffs auf die Ukraine im Jahr 2022 stiegen die Gas- und Strompreise so weit, dass mehrere Elektrostahlwerke temporär den Betrieb einstellen mussten.^{[37] [38] [39]}

Versorgungssicherheit

Es fallen vergleichsweise geringe Wasserstoffbedarfe an, die in Konkurrenz zu anderen Anwendungen stehen würden. Allerdings würden durch eine Ausweitung der Elektrostahlproduktion große Mengen erneuerbaren Stroms benötigt. Durch den Wegfall der Hochöfen entfällt auch die Verstromung der Gichtgase, welche durch erneuerbaren Strom ersetzt werden muss. Für das Gesamtenergiesystem könnten diese zusätzlichen Strommengen (zwölf Terawattstunden) versorgungstechnisch eine Herausforderung darstellen. Bei Importen von direktreduzierten Eisenbriketts könnten wiederum neue geopolitische Abhängigkeiten entstehen.

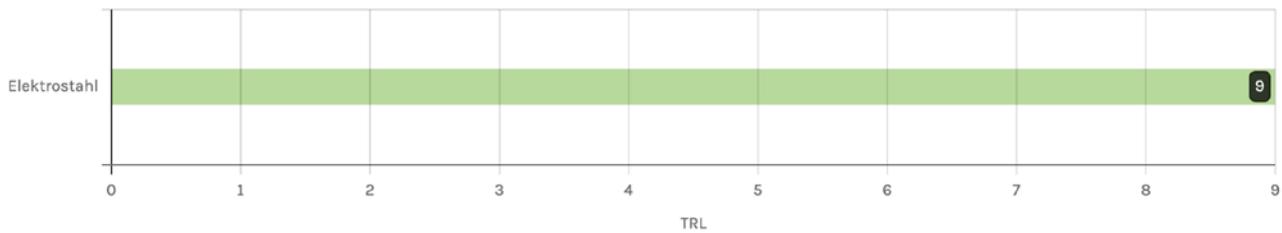
Akteur*innen

- › Stahlhersteller

Technologiereifegrad

Technologiereifegrad

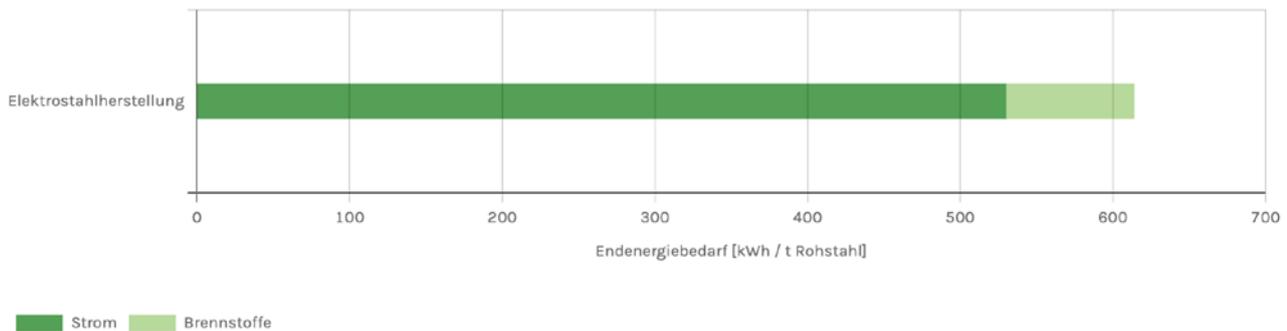
Elektrostahlöfen befinden sich bereits im großskaligen Einsatz: Der Technologiereifegrad beträgt 9.



Endenergiebedarf

Im Mittel werden etwa 530 Kilowattstunden elektrischer Energie pro Tonne Rohstahl und etwa 84 Kilowattstunden Brennstoffe pro Tonne Rohstahl benötigt.^[40] Um 30 Prozent der deutschen Stahlproduktion über Sekundärstahl (12 Millionen Tonnen Rohstahl) bereitzustellen, sind also etwa 6 Terawattstunden Strom und 1 Terawattstunde Brennstoffe nötig.

Endenergiebedarf der Elektrostaalherstellung in Kilowattstunden pro Tonne Rohstahl^[40]



Auch bei den weiteren Verarbeitungsschritten wird Energie benötigt. Für eine Tonne Elektrostaal fallen so etwa 810 Kilowattstunden an.^[40]

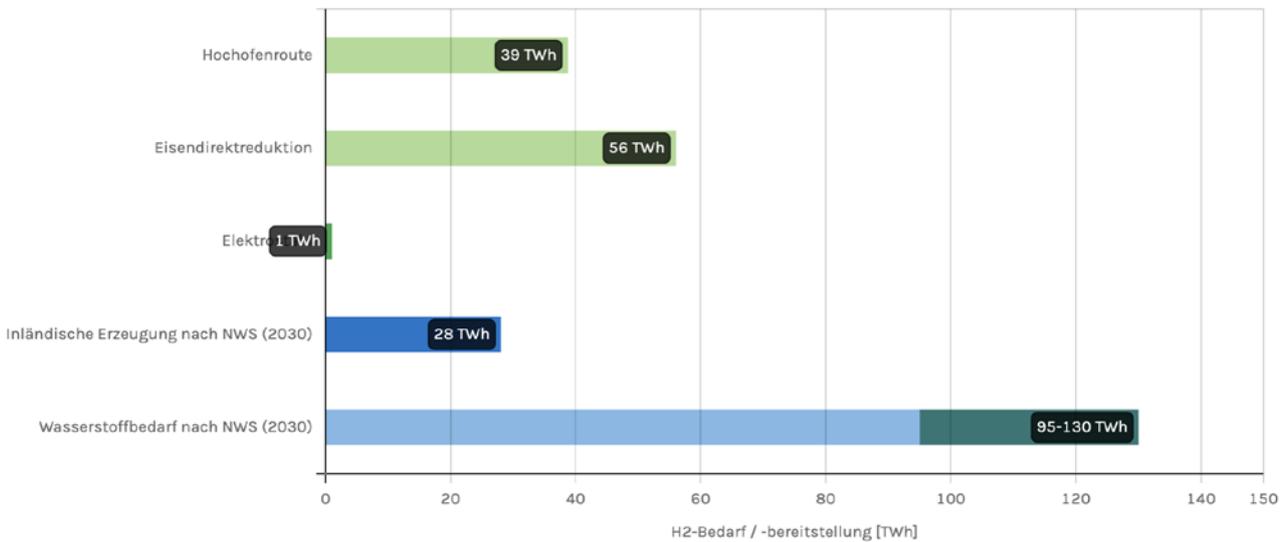
Wasserstoffbedarfe

Wasserstoff wird hier nicht stofflich, sondern für die Wärmebereitstellung in Folgeprozessen benötigt. Für die Produktion von 12 Millionen Tonnen Sekundärstahl würde daher etwa 1 Terawattstunde Wasserstoff nötig.



Wasserstoffbedarf der Elektro Stahlproduktion im Vergleich

mit dem Einblasen von Wasserstoff in den Hochofen, der Eisendirektreduktion und den politischen Erwartungen. Unter der Annahme, dass die gesamte deutsche Sekundärstahlproduktion (12 Millionen Tonnen) auf Elektro Stahl umgestellt wird und dass die benötigte Wärmemenge ausschließlich durch Wasserstoff bereitgestellt wird, ergibt sich mit dem spezifischen Wärmebedarf von 84 kWh pro Tonne Elektro Stahl ein Gesamt-Wasserstoffbedarf von etwa 1 TWh.

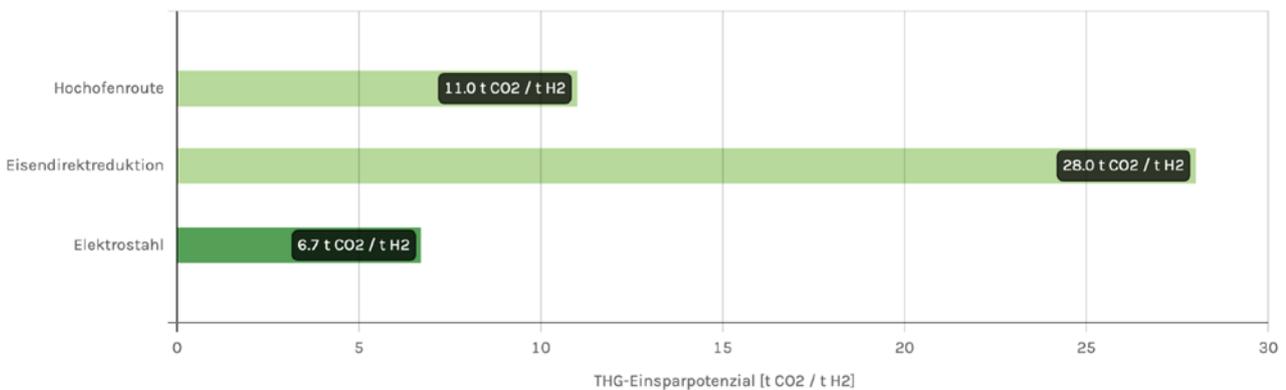


Minderungspotential

Durch Wasserstoff wird eine Terawattstunde verschiedener Brennstoffe ersetzt. Wenn hauptsächlich Erdgas verwendet wird, dann können 6,7 Tonnen CO₂-Emissionen pro Tonne eingesetzten Wasserstoffs eingespart werden.

Treibhausgasminderungspotential der Elektro Stahlproduktion im Vergleich

mit dem Einblasen von Wasserstoff in den Hochofen und der Eisendirektreduktion.



Literatur

- [1] **Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST) (2022):** Emissionsfreie Stahlerzeugung.
https://lbst.de/wp-content/uploads/2022/04/2022-03-30-HySteel-LBST_Emissionsfreie_Stahlerzeugung.pdf
- [2] **BDI: Boston Consulting Group und Prognos (2018):** Klimapfade für Deutschland. https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/20180118_bdi_studie_klimapfade_fuer_deutschland_01.pdf
- [3] **Boston Consulting Group und Prognos (2021):** Klimapfade 2.0.
<https://www.bcg.com/germany/klimapfadeBDI>
- [4] **European Commission (2020):** Clean Steel Partnership Roadmap.
<https://www.estep.eu/assets/Uploads/200715-CSP-Roadmap.pdf>
- [5] **dena Deutsche Energie-Agentur (2018):** dena-Leitstudie Integrierte Energiewende.
https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf
- [6] **dena Deutsche Energie-Agentur (2021):** dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität.
<https://www.dena.de/newsroom/meldungen/dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet/>
- [7] **The European Steel Association (2019):** Low Carbon Roadmap.
<https://www.eurofer.eu/assets/Uploads/EUROFER-Low-Carbon-Roadmap-Pathways-to-a-CO2-neutral-European-Steel-Industry.pdf>
- [8] **Agora Industry; Wuppertal Institut und Lund University (2021):** Global Steel at a Crossroads. <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/global-steel-at-a-crossroads/>
- [9] **Bukold, S.; Huneke, F. und Claußner, M. (2020):** Grün oder blau? Greenpeace Energy. https://green-planet-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/Gruen_oder_blau_Wege_in_die_Wasserstoffwirtschaft_final.pdf
- [10] **International Energy Agency (2020):** Iron and Steel Technology Roadmap (Energy Technology Perspectives).
<https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
- [11] **Agora Energiewende (2021):** Klimaneutrales Deutschland 2045.
<https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>
- [12] **Agora Energiewende (2020):** Klimaneutrales Deutschland.
<https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland/>
- [13] **Wietschel et al. (2021):** Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Fraunhofer ISI; Fraunhofer ISE und Fraunhofer IEG, Karlsruhe; Freiburg und Cottbus.
https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/Metastudie_Wasserstoff_Abschlussbericht.pdf
- [14] **AFRY Management und Agora Energiewende (2021):** No-regret hydrogen: Charting early steps for H₂ infrastructure in Europe.
<https://www.agora-energiewende.de/en/publications/no-regret-hydrogen/>
- [15] **Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE (2021):** Wasserstoffbasierte Industrie in Deutschland und Europa, Berlin.
<https://www.arbeit-umwelt.de/wasserstoffbasierte-industrie-in-deutschland-und-europa/>

- [16] **Günther et al. (2019):** Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/den-weg-zu-einem-treibhausgasneutralen-deutschland>
- [17] **Wirtschaftsvereinigung Stahl (2021):** Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2021.
https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Fakten-2021_RZ_Web_neu.pdf
- [18] **Statista (2023):** Umsatz der Stahlindustrie in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2022, zuletzt aufgerufen am: 20.07.2023.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/74060/umfrage/umsatzerloese-in-der-stahlindustrie-in-deutschland-seit-1995/>
- [19] **Energiesystem-Forschung:** Projekt H₂-Stahl, zuletzt aufgerufen am: 22.05.2023.
<https://www.energiesystem-forschung.de/forschen/projekte/reallabor-der-energie-wende-h2-stahl>
- [20] **Rölling, M.; Weng, M. und Gellert, S.:** Wertung der Herstellung von Eisenschwamm unter Verwendung von Wasserstoff. ArcelorMittal, Hamburg.
<https://germany.arcelormittal.com/icc/arcelor/med/b8e/b8e0c15a-102c-d51d-b2a9-147d7b2f25d3,11111111-1111-1111-1111-111111111111.pdf>
- [21] **Herwartz, C., 18.01.2022:** Wenn sich der Energiebedarf verzehnfacht – Investoren warten auf Entscheidungen der Koalition, Handelsblatt.
<https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/handelsblatt-energie-gipfel-wenn-sich-der-energiebedarf-verzehnfacht-investoren-warten-auf-entscheidungen-der-koalition/27985472.html>
- [22] **Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022):** Zahlen und Fakten: Energiedaten. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- [23] **UBA:** CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom steigen 2021 wieder an, zuletzt aufgerufen am: 20.07.2023. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-steigen>
- [24] **Wasserstoff-Kompass (2022):** Auf dem Weg in die deutsche Wasserstoffwirtschaft: Resultate der Stakeholder*innen-Befragung.
https://doi.org/10.48669/h2k_2022-1
- [25] **Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz:** Programm Klimaschutzverträge (Carbon Contracts for Difference, CCfD), zuletzt aufgerufen am: 18.01.2023. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Foerderung-National/018-pilotprogramm.html>
- [26] **Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI):** Wann lohnen sich Carbon Contracts for Differences? Die Effekte unsicherer CO₂-Preise und Kosten sowie deren Implikationen auf die Ausgestaltung, zuletzt aufgerufen am: 18.01.2023. <https://www.ewi.uni-koeln.de/en/publikationen/wann-lohnen-sich-carbon-contracts-for-differences/>
- [27] **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie:** Für eine starke Stahlindustrie in Deutschland und Europa! Handlungskonzept Stahl, Berlin, zuletzt aufgerufen am: 20.07.2023. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/handlungskonzept-stahl.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [28] **IFRS Foundation, 21.10.2022:** ISSB unanimously confirms Scope 3 GHG emissions disclosure requirements with strong application support, among key decisions [Pressemitteilung]. <https://www.ifrs.org/news-and-events/news/2022/10/issb-unanimously-confirms-scope-3-ghg-emissions-disclosure-requirements-with-strong-application-support-among-key-decisions/>

- [29] **Shell International B.V. und Deloitte:** Decarbonising Steel: Forging New Paths Together, zuletzt aufgerufen am: 19.01.2023. <https://www2.deloitte.com/nl/nl/pages/sustainability/articles/decarbonizing-the-steel-value-chain.html>
- [30] **World Economic Forum:** What is the difference between Scope 1, 2 and 3 emissions, and what are companies doing to cut all three? zuletzt aufgerufen am: 19.01.2023. <https://www.weforum.org/agenda/2022/09/scope-emissions-climate-greenhouse-business/>
- [31] **Agora Energiewende und Guidehouse (2021):** Making renewable hydrogen cost-competitive: Policy instruments for supporting green H₂. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_11_EU_H2-Instruments/A-EW_223_H2-Instruments_WEB.pdf
- [32] **Fischer, A. und Küper, M. (2021):** Green Public Procurement: Potenziale einer nachhaltigen Beschaffung. Emissionsvermeidungspotenziale einer nachhaltigen öffentlichen Beschaffung am Beispiel klimafreundlicher Baumaterialien auf Basis von grünem Wasserstoff. Institut der deutschen Wirtschaft, Köln. https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/policy_papers/PDF/2021/IW-Policy-Paper_2021-Green-Public-Procurement.pdf
- [33] **Küster-Simic, A.; Knigge, M. und Schönfeldt, J. (2020):** Struktur, Entwicklung und Zukunft der deutschen Stahlindustrie: Eine Branchenanalyse, Working Paper Forschungsförderung, No. 187, Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf. https://www.boeckler.de/fpdf/HBS-007701/p_fofoe_WP_187_2020.pdf
- [34] **Kopernikus-Projekt Ariadne (2021):** Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. https://ariadneprojekt.de/media/2022/02/Ariadne_Szenarienreport_Okttober2021_corr0222.pdf
- [35] **Fraunhofer ISI et al.:** Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3, zuletzt aufgerufen am: 13.07.2023. <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php>
- [36] **Robinius et al. (2020):** Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050. Forschungszentrum Jülich. https://user.fz-juelich.de/record/877960/files/Energie_Umwelt_499.pdf
- [37] **DER SPIEGEL:** Erstes deutsches Stahlwerk stoppt Produktion, 10.03.2022. <https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/teurer-strom-erstes-deutsches-stahlwerk-stoppt-produktion-a-5507842f-11f3-4dd4-8785-f9e809888e11>
- [38] **rbb24INFORADIO:** Stahlwerk Hennigsdorf leidet unter Strompreisen und Absatzflaute, 15.03.2023. <https://www.inforadio.de/rubriken/wirtschaft/beitraege/2023/03/stahlwerk-hennigsdorf-leidet-unter-strompreisen-und-absatzflaute.html>
- [39] **Lehmann, S.:** Hohe Strompreise zwingen Riesas Stahlwerk zu Pausen, 31.08.2022, SÄCHSISCHE ZEITUNG. <https://www.saechsische.de/riesa/wirtschaft/strompreise-zwingen-feralpi-zu-pausen-5748651-plus.html>
- [40] **Navigant Energy Germany et al. (2019):** Energiewende in der Industrie. Branchensteckbrief der Eisen- und Stahlindustrie. Bericht an: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-stahl.pdf?__blob=publicationFile&v=4



Beteiligte Institutionen

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

www.acatech.de

Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Die DECHEMA ist das kompetente Netzwerk für chemische Technik und Biotechnologie in Deutschland. Sie vertritt als gemeinnützige Fachgesellschaft diese Gebiete in Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. Die DECHEMA fördert den technisch-wissenschaftlichen Austausch von Fachleuten unterschiedlicher Disziplinen, Organisationen und Generationen und bündelt das Know-how von über 5.500 Einzel- und Fördermitgliedern. Sie engagiert sich in (inter-)nationalen technischen Expertengremien und ist in öffentlich geförderten F&E-Projekten sowie der Auftragsforschung aktiv. Dabei koordiniert sie große Forschungsverbände und ist in verschiedenen Fördermaßnahmen für die Begleitforschung verantwortlich.

www.dechema.de

Autor*innen

- > **Dr. Jens Artz**
Teamleiter DECHEMA
- > **Dr. Benjamin Baur**
Referent Stakeholder-Dialog acatech
- > **Marie Biegel**
Studentische Hilfskraft acatech
- > **Dr. Dominik Blaumeiser**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Jasper Eitze**
Teamleiter acatech
- > **Dr. Alexandra Göbel**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Tamara Hanstein**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Dr. Christopher Hecht**
Wissenschaftlicher Referent ISEA RWTH Aachen University / acatech
- > **Thomas Hild**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Florian Hölting**
Wissenschaftlicher Referent ISEA RWTH Aachen University / acatech
- > **David Knichel**
Wissenschaftlicher Referent acatech
- > **Valerie Kwan**
Referentin Stakeholder-Dialog acatech
- > **Jördis Lemke**
Teamassistentin acatech
- > **Dr. Michaela Löffler**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Dr. Andrea Lübcke**
Teamleiterin acatech
- > **Alena Müller**
Referentin Stakeholder-Dialog acatech
- > **Lars Ole Reimer**
Redakteur Multimedia acatech
- > **Dr. Damien Rolland**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Anna Runkel**
Studentische Hilfskraft acatech
- > **Emre Yildirim**
Studentische Hilfskraft acatech

Ansprechpartner*innen acatech

- > **Jasper Eitze**
eitze@acatech.de
- > **Dr. Andrea Lübcke**
luebcke@acatech.de

Ansprechpartner*innen DECHEMA

- > **Dr. Jens Artz**
jens.artz@dechema.de
- > **Dr. Michaela Löffler**
michaela.loeffler@dechema.de



WASSERSTOFF KOMPASS

IMPRESSUM

Wasserstoff-Kompass
- Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft

Herausgebende

**acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e.V.**

Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München
T +49 (0) 89 / 52 03 09-0
F +49 (0) 89 / 52 03 09-900
info@acatech.de
www.acatech.de

**DECHEMA Gesellschaft für
Chemische Technik und Biotechnologie e.V.**

Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main
T +49 (0) 69 / 75 64-0
info@dechema.de
www.dechema.de

Geschäftsführendes Gremium des Präsidiums / acatech

Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner, Prof. Dr. Ursula Gather,
Dr. Stefan Oschmann, Manfred Rauhmeier,
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber,
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner
Vorstand i.S.v. § 26 BGB:
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner,
Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier

Verantwortlicher im Sinne des Presserechts

Dr. Jens Artz, DECHEMA

Redaktion

Jasper Eitze, Dr. Andrea Lübcke / acatech
Dr. Jens Artz, Dr. Michaela Löffler / DECHEMA

Gestaltung und Satz

Lindner & Steffen GmbH, www.lindner-steffen.de

Bildnachweis

AdobeStock: DedMityay

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium
für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) sowie dem
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens
(FKZ 03EWT002).

Betreut wurde das Projekt durch den Projektträger Jülich.

Erschienen im März 2024 in Frankfurt am Main

1. Auflage

ISBN 978-3-89746-245-8

www.wasserstoff-kompass.de

Empfohlene Zitierweise

acatech, DECHEMA (Hrsg.): Wasserstoff-Kompass
- Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft,
Frankfurt am Main 2023, ISBN: 978-3-89746-245-8
<https://www.wasserstoff-kompass.de/handlungsfelder#>



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages