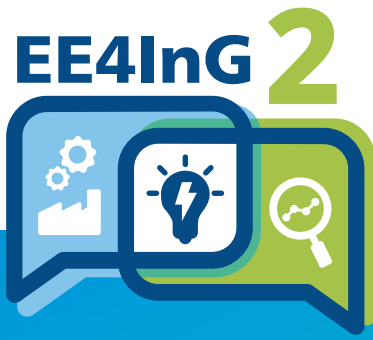




Direktreduktion von Eisenerz mittels Wasserstoff Technikentwicklung, Marktpotenzial und Forschungsförderung

Studie im Rahmen des Verbundvorhabens EE4InG2

EE4InG2

Begleitforschung für
Energieeffizienz in
Industrie und Gewerbe 2.0

ee4ing2.de

Karlsruhe, Aachen, Bensheim
16. Juli 2026

Das Begleitforschungsvorhaben EE4InG2 im Überblick

Projekthintergrund

Die **Energieforschungsförderung** orientiert sich an den energie- und klimapolitischen Zielen der Bundesregierung. Hauptziel ist dabei Klimaneutralität bis 2045 unter anderem durch höhere Energieeffizienz und den Ausbau erneuerbarer Energien. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) flankiert diese Ziele durch **Forschungsförderung der angewandten Energieforschung** im Rahmen des **Energieforschungsprogramms**. Ein Fokus liegt dabei auf der Energie- und Ressourceneffizienz in Industrie und Gewerbe. Das **Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe** fördert den Austausch von Experten in diesen Bereichen. Das BMWE prüft die Wirksamkeit des Energieforschungsprogramms und dessen zukünftige Entwicklung durch **Begleitforschung**. Die Begleitforschung dient schließlich als Instrument zur Bewertung und Weiterentwicklung der Forschungsförderung.

Projektziele

Das Verbundvorhaben EE4InG2 wurde konzipiert als **Begleitforschungsprojekt** für das **Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe (FN IuG)**. Ein zentrales Projektziel ist die **wissenschaftliche Querauswertung der angewandten Energieeffizienzforschung und -förderung** durch das Energieforschungsprogramm im Hinblick auf Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Ein weiteres Projektziel ist die **Förderung des Austausches zwischen relevanten Akteuren des Innovationssystems** (Industrie, Wissenschaft, Politik), koordiniert durch eine im Projekt zu schaffende Koordinierungsstelle für das Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe. Das Projekt knüpft an die inhaltlichen Vorarbeiten des vorausgegangenen Verbundvorhabens "EE4InG: Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe – Vernetzung und Begleitung der FuE-Aktivitäten sowie Beschleunigung der Ergebnisverbreitung" (FKZ: 03ET1630A-B) an.

Kontakt

projektleitungEE4InG2@irees.de

<https://ee4ing2.de/>

Projektpartner



**IREES – Institut für
Ressourceneffizienz und
Energiestrategien GmbH**

Durlacher Allee 77
76131 Karlsruhe
Ansprechpartnerin:
Dr. Heike Brugger

Tel.: +49 721 9152636-0
E-Mail: h.brugger@
irees.de



**RWTH Aachen University
Institut für
Industrieofenbau und
Wärmetechnik (IOB)**

Kopernikusstr. 10
52074 Aachen
Ansprechpartner:
Felix Kaiser

Tel.: +49 241 80 26068
E-Mail: kaiser@iob.rwth-
aachen.de



ETA-Solutions GmbH

Darmstädter Str. 239
64625 Bensheim
Ansprechpartnerin:
Juliane Heydemann

Tel. +49 6251 82555 42
E-Mail: heydemann@eta-
solutions.de

Hinweise

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben „EE4InG2 – Begleitforschung für Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe 2.0“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03EN2107A-C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autorinnen und Autoren.

Autorenschaft, Zitationshinweise

Rothhöft, Katharina; Kaiser, Felix; Schwotzer, Christian (2026): Direktreduktion von Eisenerz mittels Wasserstoff: Technikentwicklung, Marktpotenzial und Forschungsförderung. Studie im Rahmen des Begleitforschungsvorhabens EE4InG2. Hg. v. Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik der RWTH Aachen University. Aachen.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Executive Summary	6
2	Hintergrund, Zielsetzung und methodisches Vorgehen	8
3	Darstellung der Technik: Direktreduktion von Eisenerz mittels Wasserstoff im Schachtofen.....	10
3.1	Funktionsprinzip	10
3.2	Reife und Stand der Technikentwicklung	15
3.3	Anwendungsbereiche, Bedeutung und Marktpotenziale.....	16
3.4	Konkurrenztechniken	17
3.4.1	Wasserstoff-Direktreduktion + Schmelzofen + Einblaskonverter.....	17
3.4.2	Konventioneller Hochofen + CC	18
3.4.3	Eisenerzelektrolyse.....	20
3.4.4	Alternative Direktreduktionsverfahren.....	21
3.5	Patentanalyse	22
3.5.1	Quantitative Patentrecherche.....	22
3.5.2	Qualitative Recherche	25
4	Relevanz in Forschung und Entwicklung	27
4.1	FuE in Deutschland.....	27
4.2	FuE im Rahmen des Energieforschungsprogramms.....	29
4.3	Verankerung der Technik im 8. Energieforschungsprogramm.....	31
5	Erforderlicher FuE-Bedarf.....	33
5.1	Wechsel von Erdgas zu Wasserstoff.....	33
5.2	Einsatzmaterial	33
5.3	Vorwärmung Wasserstoff/Umgang mit endothermer Reaktion	35
6	Energiewirtschaftliche Bedeutung und weitere Effekte.....	37
6.1	Entwicklung Stahlproduktion	38
6.2	Entwicklung Endenergiebedarf in Deutschland.....	40
6.3	Weitere erwartete Effekte	43
6.3.1	Flexibilisierung.....	43
6.3.2	Stoffströme	44
6.3.3	Beschäftigung.....	45

6.3.4	Auslagerung ins Ausland.....	45
6.3.5	Aufbau Wasserstoff Versorgungsinfrastruktur	45
7	Funktionalität des Innovationssystem der Technik in Deutschland.....	47
8	Identifizierte Hemmnisse und fördernde Faktoren	49
9	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	51
	Abbildungsverzeichnis	54
	Tabellenverzeichnis	55
	Anhang.....	56
	A. Reaktionsmechanismen Eisenerzreduktion.....	56
	Literatur.....	57

1 Executive Summary

Die Eisen- und Stahlindustrie ist eine bedeutende Quelle globaler Emissionen und verantwortlich für circa 7 % der weltweiten CO₂-Emissionen [1]. Konventionell wird Stahl in einem Hochofen unter Einsatz von Kohle als Reduktionsmittel und Energieträger produziert. Das entstehende Roheisen wird anschließend in einem Konverter mit Sauerstoff verblasen und in nachgeschalteten Prozessschritten behandelt. Über diese Herstellungsrouten werden 71,1 % des weltweiten Stahls hergestellt [2].

Neben der Hochofenroute gewinnt die sogenannte Wasserstoff-Direktreduktionsroute (H₂-DRI-Route) an Bedeutung. Diese besitzt das Potential, den CO₂-Fußabdruck pro Tonne Stahl im Vergleich zur herkömmlichen Hochofenroute zwischen 90 % und 98 % zu senken, wenn grüner Wasserstoff verwendet wird [3–5]. Die Relevanz der Technik zeigt sich nicht nur in ihrer klimapolitischen Bedeutung, sondern auch in der zunehmenden Innovationsdynamik. Insbesondere seit 2018 ist ein deutlicher Anstieg der Patentanmeldungen im Bereich der Direktreduktion feststellbar. Zu den wichtigsten Anmeldeländern zählen Japan, die USA, Schweden, Deutschland und China.

Deutschland nimmt in diesem Kontext eine wichtige Rolle ein. Die Forschungslandschaft zur wasserstoffbasierten Direktreduktion ist breit aufgestellt und durch eine enge Vernetzung von Wissenschaft und Industrie geprägt. Die Technik wird in großskaligen Pilotprojekten mit hohen Fördervolumen unterstützt. Dadurch zählt Deutschland zu den Ländern mit einem fortgeschrittenen Entwicklungsstand in diesem Technikfeld. Gleichzeitig bestehen erhebliche Umsetzungsrisiken: Eins der vier Großprojekte zum Aufbau einer Direktreduktionsanlage wurde bereits gestoppt. [6, 7]

Für die breite Anwendung der H₂-DRI-Route bestehen insbesondere vier zentrale Hemmnisse. Erstens erschweren die langen Anlagenlebensdauern und hohen Investitionsvolumen die zeitnahe Implementierung und verlangsamen somit die Verbreitung der Technik. Zweitens ist die Einführung des wasserstoffbasierten Prozesses stark vom Ausbau geeigneter Wasserstoff- und Strominfrastruktur abhängig. Drittens stellen die hohen Kosten von grünem Wasserstoff eine wesentliche Herausforderung für die Wettbewerbsfähigkeit der Technik gegenüber anderen Stahlerzeugungstechniken dar. Viertens erfordert die Direktreduktion eine zuverlässige Versorgung mit qualitativ hochwertigem Eisenerz, während gleichzeitig weltweit die Eisenerzqualitäten sinken. Darüber hinaus sind der Wechsel des Reduktionsgases von Erdgas zu Wasserstoff, die Verwendung verschiedener Einsatzstoffe sowie die effiziente Vorwärmung des Wasserstoffs zentrale Forschungs- und Entwicklungsfelder. [1, 8]

Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegende Technikanalyse die Direktreduktion mittels Wasserstoff im Schachtofen zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie untersucht. Es werden sowohl der technische Entwicklungsstand, weitere Forschungsbedarfe und Diffusionshemmnisse betrachtet. Des Weiteren werden zentrale Stakeholder, aktuelle und vergangene Forschung und Innovationsdynamiken in Deutschland aufgezeigt. Ziel ist,

die Bedeutung der Technik im Kontext der industriellen Transformation einzuordnen und ihre Potentiale sowie Herausforderungen für eine breite Anwendung zu analysieren.

2 Hintergrund, Zielsetzung und methodisches Vorgehen

Im Rahmen von EE4InG2 wird eine große Spannbreite an Techniken betrachtet, die entweder branchenspezifisch sind oder Querschnittstechnologien darstellen. Die vorliegende Analyse erstreckt sich dabei von der Betrachtung der Förderung von Forschung und Entwicklung (FuE) in der Vergangenheit über den aktuellen Entwicklungsstand bis hin zum Entwicklungspotenzial in der Zukunft. Das Hauptziel dieser Ausarbeitung ist die Beantwortung der Frage:

„Gibt es einen Zusammenhang zwischen FuE-Förderung, heutigem Erfolg und zukünftigem Potenzial der Technik (Markteintritt und -diffusion)?“

Die zu analysierende Technik wird aus einem erstellten Technikportfolio in einem zweistufigen Auswahlprozess über Kriterien zu folgenden Hauptaspekten identifiziert: Energiewirtschaftliche Relevanz (Energiebedarf und Einsparpotenzial heute bzw. in Zukunft), Relevanz in FuE, insbesondere im Energieforschungsprogramm (EFP) der Bundesregierung (EFP-Missionen/Ziele, FuE-Projekte/Publicationen) und Technology Readiness Level (TRL). Weitere Aspekte können Szenarienabhängigkeit, Anwendungsfelder, Produktionsperspektiven und Hemmnisse verschiedener Art sein. So sollen Effizienztechniken ausgewählt werden, die ein vielversprechendes Potenzial an Energieeffizienz aufweisen und eine deutliche Verknüpfung zum 8. EFP aufweisen. Die Ergebnisse des Auswahlprozesses (Vorauswahl) fließen in die Ausarbeitung der Analyse ein. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 1 zusammengefasst.

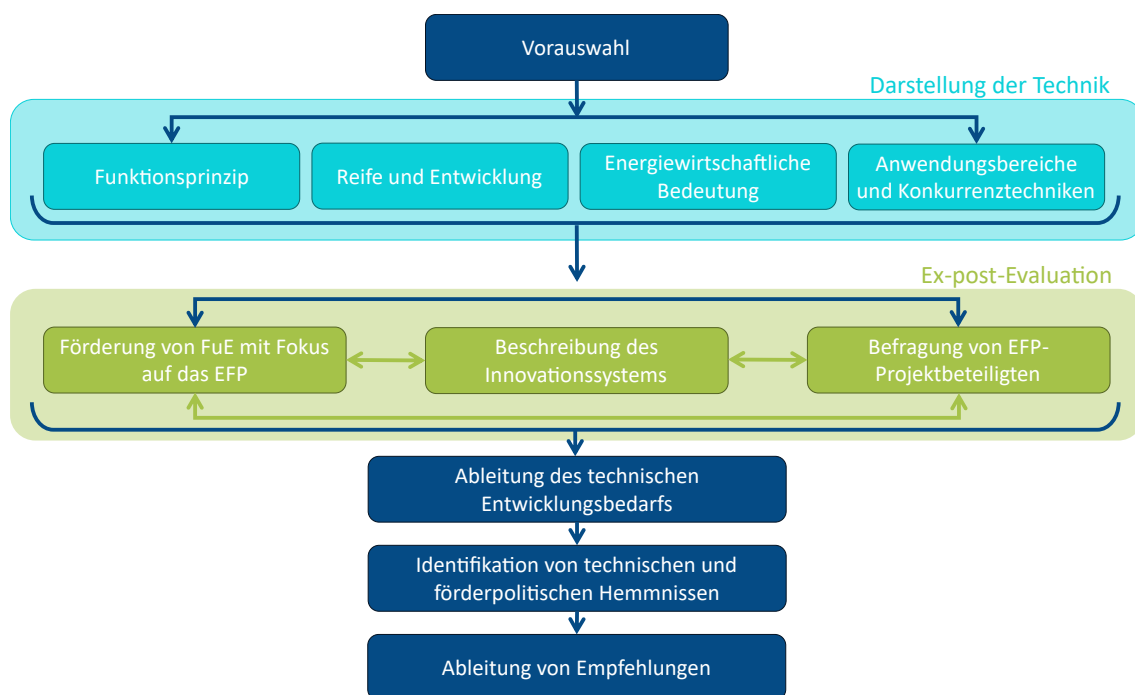


Abbildung 1: Übersicht der Methodik, angelehnt an die EDUAR&D-Methode.

Quelle: eigene Darstellung

Die genutzte Methodik ist angelehnt an EDUAR&D, kurz für „Energiedaten und -analyse R&D“, ein strukturierter Such- und Analyseprozess, der verschiedenste methodische Ansätze zur Darstellung, Analyse und Bewertung der Techniken miteinander verbindet (Jochem, 2009; Schäfer *u. a.*, 2021).

Definition des Untersuchungsrahmen der vorliegenden Analyse: Direktreduktion von Eisenerz mittels Wasserstoff

Die untersuchte Technik ist der Direktreduktionsschachtofen. Dieser wird in der primären Stahlproduktion verwendet, um Eisenerze zu Roheisen(-schwamm) zu reduzieren. In dieser Analyse wird auf die Reduktion mittels Wasserstoff eingegangen.

3 Darstellung der Technik: Direktreduktion von Eisenerz mittels Wasserstoff im Schachtofen

3.1 Funktionsprinzip

Für die Herstellung von Stahl ist zunächst die Reduktion von Eisenerz erforderlich. Hierzu muss der im Eisenerz gebundene Sauerstoff aus der Eisen-Sauerstoff-Bindung entfernt werden. Dafür ist ein Reduktionsmittel nötig, das in der Lage ist, die starke chemische Bindung zwischen Eisen und Sauerstoff zu lösen und den Sauerstoff zu binden. Im industriellen Maßstab kommen hierfür derzeit Wasserstoff und Kohlenstoff in Betracht. Wird Kohlenstoff eingesetzt, entsteht prozessbedingt Kohlenstoffdioxid, dessen Bildung vermieden werden soll. Bei der Verwendung von Wasserstoff hingegen entsteht als Reaktionsprodukt Wasser.

Die Direktreduktion ist ein Verfahren zur Reduktion von Eisenerz unterhalb des Schmelzpunktes des Einsatzmaterials, bei dem Eisen in Form von Eisenschwamm entsteht (Direct Reduced Iron, DRI). In dem Verfahren wird Eisenerz, meist in Form von Pellets, in einen Reaktor gegeben, der mit einem reduzierenden Gasgemisch durchströmt wird. Das reduzierende Gas reagiert mit dem Sauerstoff im Eisenerz, wodurch festes DRI und ein Gasgemisch aus Wasser und Kohlenstoffdioxid entstehen. Die Reduktion erfolgt bei Temperaturen zwischen 750 und 1100 °C. [8, 9]

Die Direktreduktion kann in verschiedenen Reaktoren wie Schachtofen, Wirbelbett und Behälterofen erfolgen [10]. Im Folgenden wird auf den Schachtofen eingegangen. Andere Technologien wie das Wirbelbett und der Behälterofen werden hier nicht weiter betrachtet, da sie in den derzeitigen Pilotprojekten weniger präsent sind.

Der Schachtofen zur Reduktion von Eisenoxid ist ein Gegenstromreaktor, bei dem das Reduktionsgut (Eisenerzpellets) von oben eingeführt und ein reduzierendes Gas (z. B. Erdgas, Wasserstoff, Koksofengas) von unten zugeführt wird (vgl. Abbildung 2). Das Reduktionsgas wird im unteren Bereich des Schachtofens eingeblasen, strömt dem festen Aufgabegut entgegengesetzt und verlässt am oberen Teil den Schachtofen. Die Reduktion der Eisenerzpellets erfolgt in der festen Schüttung. Im Gegensatz zum Hochofen entsteht im Schachtofen keine Schlacke, da die Reduktion der Eisenerzpellets in einer festen Phase erfolgt und keine flüssige Phase mit Verunreinigungen entsteht, die typischerweise zur Bildung von Schlacke führen würde. [11–13]

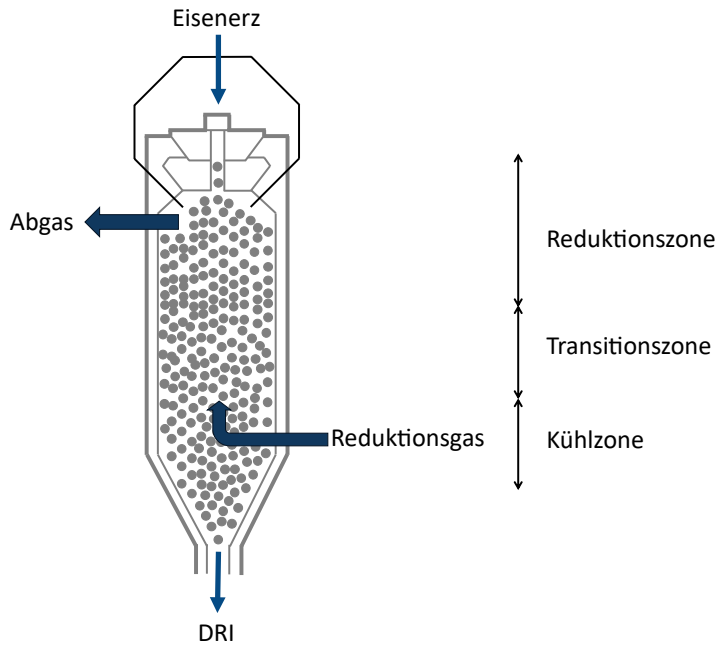


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Schachtofens zur Direktreduktion, eigene Darstellung nach [10, 14]

Das entstehende DRI wird entweder direkt in einen Schmelzreaktor wie Elektrolichtbogenofen (Electric Arc Furnace, EAF) gegeben oder für eine Weiterbehandlung an einem anderen Standort transportiert [11]. Abhängig von der Weiterverarbeitung nach dem Schachtofen wird DRI in verschiedene Arten eingeteilt:

- Kaltes DRI (CDRI): DRI wird direkt auf circa 50 °C gekühlt [15]
- Heißes DRI (HDRI): Dieses wird bei kurzen Distanzen direkt in einem Aufschmelzreaktor (meist Elektrolichtbogenofen) aufgegeben. Wird HDRI transportiert, muss dieses warmgehalten und vor Rückoxidation geschützt werden. Der Transport geschieht in speziellen Transportkesseln oder auf Transportbändern [16].
- Hot Briquetted Iron (HBI): Wird DRI heiß briquettiert und anschließend gekühlt, wird es HBI genannt. Es ist aufgrund der Materialeigenschaften (wie Struktur und vorhandene Schutzschicht) besonders gut transport- und lagerfähig [15, 17]

Grundsätzlich ist der Einsatz von unterschiedlichen Gasen als Reduktionsgas möglich. Anlagen mit Erdgas als Reduktionsgas finden bereits industriell Anwendung und sind im kleineren Maßstab¹ verglichen mit der Hochofenroute etabliert². In diesen wird entweder Erdgas direkt in den Ofen aufgegeben oder zuvor in Gasreformern zu CO und

¹ durchschnittliche Kapazität von 1,3 Mio t_{DRI/HBI} pro Jahr bezogen auf die seit 2000 errichteten Anlagen von Midrex und Energiron weltweit [18, 19].

² durchschnittliche Kapazität von 2,2 Mio t_{Rohstahl}/Jahr bezogen auf die durchschnittliche Kapazität der produzierenden Hochöfen in Deutschland [4].

H₂ umgeformt und anschließend dem Schachtofen zugeführt. Bei der Reduktion mit reinem Wasserstoff entstehen keine direkten CO₂-Emissionen. [9]

Die bedeutendsten Direktreduktionstechniken sind die Verfahren von Midrex Technologies sowie Energiron, die gemeinsam von den Anlagenbauern Tenova S.p.A. und Danieli & C. S.p.A. entwickelt wurde. Bei beiden Prozessen handelt es sich um einen im Gegenstromprinzip arbeitenden Schachtofen [12].

Midrex Technologies bietet zwei verschiedene Anlagen an, die Wasserstoff flexibel als Reduktionsgas verwenden (können): Midrex Flex und Midrex H₂. In Abbildung 3 ist die Midrex Flex Anlage schematisch dargestellt. In diesem Prozess ist der flexible Einsatz von Erdgas und Wasserstoff möglich [16]. Der Anlagenkomplex besteht aus einem Reformer, Wärmerückgewinnungssystem und dem Schachtofen. Im Reformer wird das Reduktionsgas, das für die Direktreduktion von Eisenerz nötig ist, erzeugt. Wird 100 % Erdgas verwendet, wird dieses im Reformer zu 55 % H₂ und 35 % CO umgesetzt und anschließend als reformiertes Gas dem Schachtofen zugeführt. Die restlichen 10 % des Gases bestehen aus CO₂, H₂O, CH₄ und N₂ [20]. Das Wärmerückgewinnungssystem nutzt die Abwärme aus dem Prozess, um das eingesetzte Gas vorzuwärmen und die Effizienz zu steigern. Bei diesem System handelt es sich um einen Querstrom-Wärmetauscher, der das Reduktionsgas vor dem Reformer vorwärmt. Weiterhin besteht die Möglichkeit, das Topgas zu verbrennen, um die nötige Temperatur für den Schachtofen zu erreichen. Midrex arbeitet zusätzlich an einer Möglichkeit, das Gas in verbundenen Stromerzeugungssystemen oder Stahlbehandlungsanlagen einzusetzen [16, 21–23]

Abhängig davon, wie viel Wasserstoff dem Prozess zugeführt wird, gibt es unterschiedliche Stellen, an denen Wasserstoff hinzugefügt werden kann. Soll zwischen 0 und 90 % Erdgas durch Wasserstoff ersetzt werden, kann dieses nach dem Reformer (Injektionspunkt 1) ohne Vorwärmung eingeleitet werden. Bei einer Substitution zwischen 85 und 100 % besteht die Möglichkeit, Wasserstoff vor dem Wärmerückgewinnungssystem und dem Reformer hinzuzufügen (Injektionspunkt 2). Zusätzlich können die Brenner des Reformers zwischen 75-100 % mit Wasserstoff betrieben werden (Injektionspunkt 3). [16] Bei der praktischen Umsetzung wird 90 % Wasserstoff genutzt und die restlichen 10 % sind andere Gase (CO, CO₂, H₂O, CH₄) um die Karbonisierung des DRI zu ermöglichen und die Prozessatmosphäre zu überwachen. [16, 22]

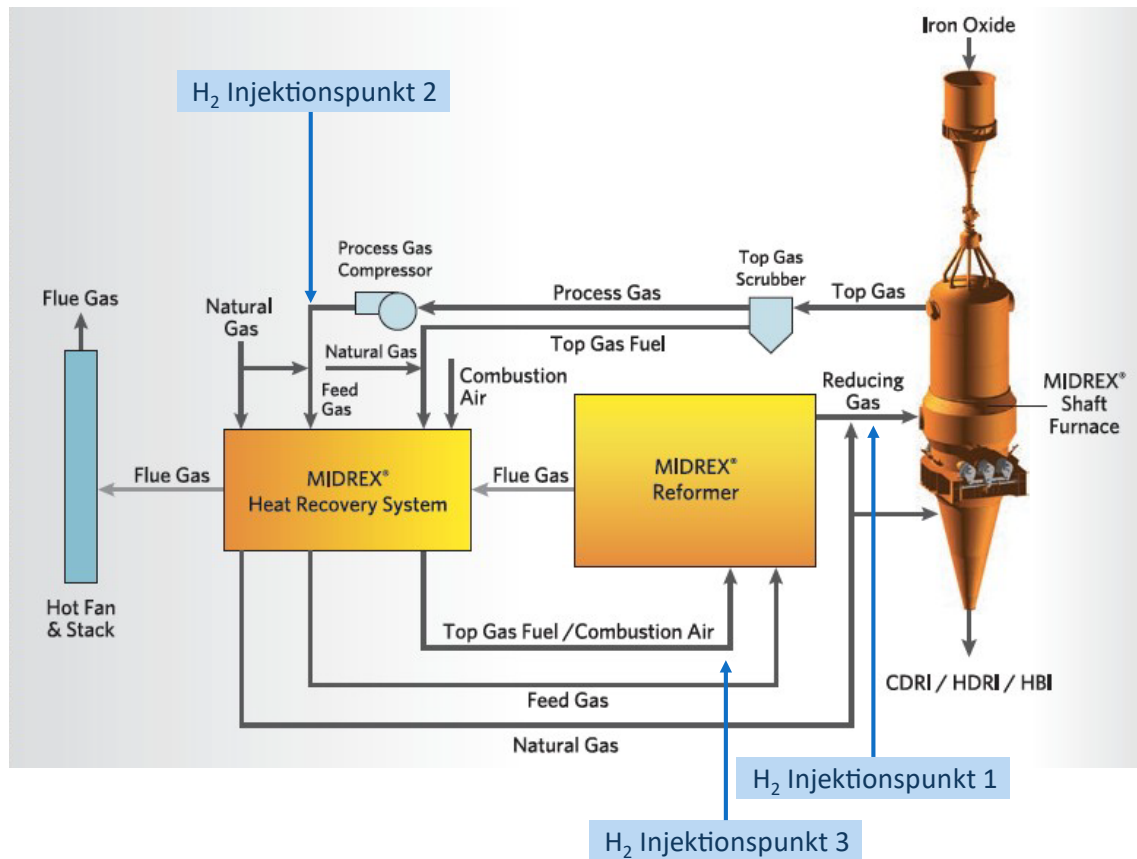


Abbildung 3: Schematische Darstellung des MIDREX Flex Schachtofen [16, 21]

Bei der Verwendung von 100 % Wasserstoff verändert sich der Anlagenkomplex. In Abbildung 4 ist der H₂DRI Schachtofen von MIDREX dargestellt. Der Gasreformer fällt bei der Verwendung von reinem Wasserstoff weg. Die Reduktion mit Wasserstoff ist im Gegensatz zur Erdgasreduktion endotherm, weshalb dem Prozess zusätzlich Wärmeenergie zugeführt werden muss³. Um die nötige Wärmeenergie in den Prozess einzubringen, ist eine zusätzliche Vorwärmung des Wasserstoffs nötig.

Um den Wasserstoff vorzuwärmen, sind bis zu 300 Nm³ H₂/t_{DRI} nötig [16]. Hierbei können jedoch auch andere Erwärmungsmethoden verwendet werden, die nicht auf der Verbrennung von Wasserstoff basieren wie beispielsweise eine elektrische Erwärmung. Laut Midrex besteht die Möglichkeit, alle bisherigen Anlagen, die mit Erdgas betrieben werden, umzurüsten und mit Wasserstoff zu betreiben [3, 16, 22]. Für die Reduktion des Eisenerzes sind 550-650 Nm³/t_{DRI} Wasserstoff nötig [16].

³ Eine ausführlichere Erläuterung der Reaktionsmechanismen der Eisenerzreduktion mittels Wasserstoff ist in Anhang A aufgeführt.

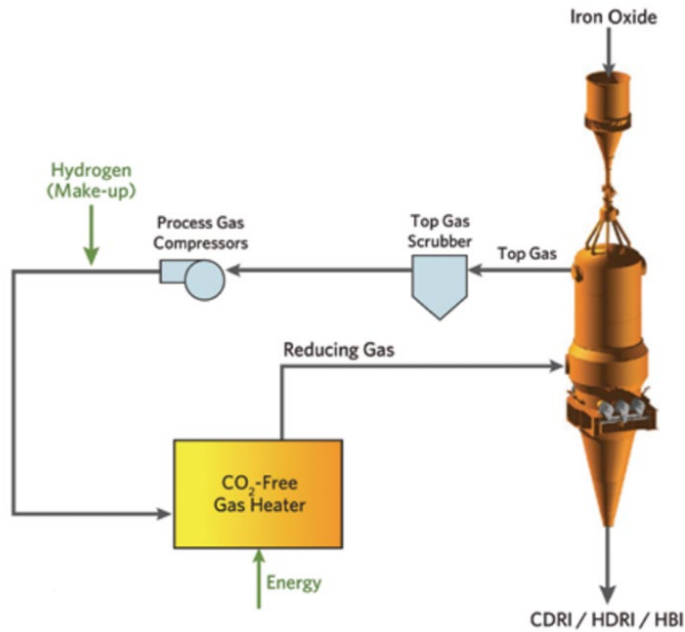


Abbildung 4: Schematische Darstellung des H₂-Schachtofens von MIDREX [16]

Energiron ist das Ergebnis aus einer Allianz zwischen den Anlagenbauern Tenova und Danieli. Die Energiron ZR DRI Anlage (Zero Reformer Direct Reduced Iron) bietet laut Energiron die Möglichkeit, bei geringen Anpassungen mit 100 % Wasserstoff zu fahren. Der Direktreduktionsprozess erfolgt bei einer Betriebstemperatur von circa 1080 °C und einem Druck zwischen 6 und 8 bar [24]. Ein zentrales Merkmal ist, dass bei einem erdgasbasierten Betrieb kein separater Reformer eingesetzt wird und die Reformierung des Erdgases direkt im oberen Teil des Schachtreaktors erfolgt. Dies ermöglicht es, verschiedene Reduktionsgase in beliebigen Mischungsverhältnissen zu verwenden und eine Anpassung auf einen Betrieb mit 100 % Wasserstoff ist mit weniger Aufwand verbunden [17, 24, 25].

Auch hier muss bei der Umstellung von Erdgas auf Wasserstoff aufgrund der endothermen Reduktionsreaktion dem Prozess zusätzliche Wärmeenergie zugeführt werden. Energiron hat bereits ein Konzept für eine elektrische Gaserwärmung entwickelt. Diese basiert auf Widerstandsheizung, die laut Energiron eine Effizienz von 95 % erreicht. Das System ist modular aufgebaut, sodass laut Energiron eine schrittweise Transformation der gasbefeuerten Vorwärmung auf elektrische Vorwärmung möglich ist. Eine hybride Lösung, bei der beide Techniken kombiniert werden, ist ebenfalls möglich. [26]

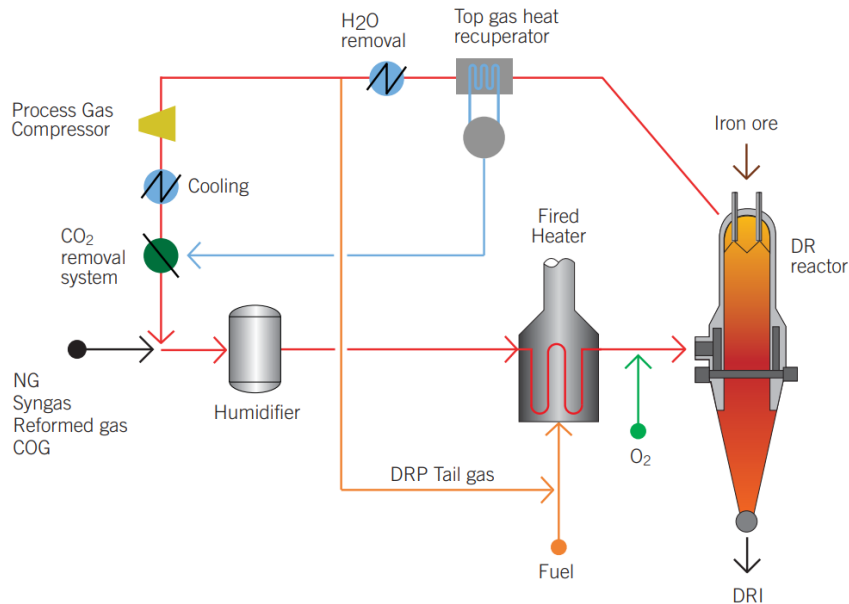


Abbildung 5: Standard Prozessschema Energiron [17]

3.2 Reife und Stand der Technikentwicklung

Die erdgasbasierte DRI-Technologie hat bereits einen hohen Reifegrad erreicht und weist einen TRL von 9 auf. Dies bedeutet, dass die Technik bereits in großem Maßstab kommerziell eingesetzt wird. Aktuell konzentriert sich die Weiterentwicklung auf eine weitere Steigerung der Produktionskapazität, um die Nachfrage nach emissionsärmeren Produktionsverfahren im Vergleich zur Hochofenroute zu bedienen. [1]

Wird der Schachtofen grundsätzlich erdgasbasiert betrieben, jedoch das Erdgas durch einen Anteil an elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff ausgetauscht, beträgt der TRL 7. Das bedeutet, dass sich die Direktreduktion noch in der Pilot- und Demonstrationsphase befindet und weitere Fortschritte in der Forschung und Entwicklung notwendig sind, bevor eine breite industrielle Anwendung möglich ist. Wird der Schachtofen ausschließlich mit elektrolytischem Wasserstoff betrieben, schätzt die internationale Energieagentur (IEA) den TRL auf 5 ein. Dies beschreibt den Test eines großen Prototyps unter Bedingungen, die denen des realen Einsatzes nahekommen. Ziel ist, die Funktionalität und das Zusammenspiel aller Komponenten in einer realitätsnahen Umgebung zu validieren. Laut der IEA wird jedoch erwartet, dass wasserstoffbasierte DRI-Techniken bis 2030 weitgehend verfügbar sein können. [1, 27]

Derzeit gibt es weltweit keine kommerzielle industrielle Anlage, die vollständig mit Wasserstoff betrieben wird. In Deutschland befinden sich aktuell mehrere Pilotanlagen im Bau, die in einem ersten Schritt noch Erdgas verwenden, um den Übergang zu einer wasserstoffbasierten Produktion vorzubereiten (vgl. Abschnitt 4.1). Auch in anderen Ländern gibt es Pilotprojekte wie beispielsweise in Schweden. Hier wird im Rahmen des Hybrit-Projektes an der Entwicklung wasserstoffbasierter DRI gearbeitet und es wurde im Jahr 2020 eine Pilotanlage errichtet, in der Versuche mit Wasserstoff durchgeführt

werden. Diese Pilotanlage ist im industriellen Maßstab konzipiert, dient aber primär Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Bei Betrieb weist sie eine Kapazität von bis zu 1 t_{DRI}/Stunde auf. [28, 29]

3.3 Anwendungsbereiche, Bedeutung und Marktpotenziale

Die wasserstoffbasierte Direktreduktion bietet die Möglichkeit, konventionelle Hochöfen schrittweise vollständig zu ersetzen und das Potential, die gesamte Prozesskette der Stahlproduktion nachhaltig zu verändern. Aktuell befinden sich in Deutschland 16 Hochöfen in Betrieb, die im Mittel eine Kapazität von rund 2,2 Mio t Rohstahl pro Jahr aufweisen [4]. Im Jahr 2023 wurden in Deutschland insgesamt 35,4 Mio t Rohstahl produziert. Während Direktreduktionsanlagen, die mit Erdgas betrieben werden, vor allem in Regionen mit günstiger Gasverfügbarkeit, wie Indien, bereits im kleinen Maßstab eingesetzt werden, steht in Deutschland der kommerzielle Einsatz aktuell noch aus. Die einzige Direktreduktionsanlage mit einer Kapazität von circa 0,4 Mio Tonnen Primärstahl wurde von ArcelorMittal betrieben und im Jahr 2022 stillgelegt [19, 30].

Der Umstieg der Stahlproduktion auf die Direktreduktion erfordert eine vollständige Anpassung der Produktionsroute, wie in Abbildung 6 dargestellt. Sowohl das Einsatzmaterial als auch die Aufbereitungsverfahren ändern sich, da der Einsatz im Schachtofen andere Anforderungen an die Qualität und Beschaffenheit der Eisenerze stellt. Der entstehende Eisenschwamm wird anschließend metallurgisch weiterbehandelt. Zum Einschmelzen und für die metallurgische Behandlung wird der Elektrolichtbogenofen verwendet. Somit entfällt der Konverter aus der Produktionsroute (mit Ausnahme der Thyssenkrupp-Route, vgl. Kapitel 3.4.1). Dies stellt eine grundlegende Veränderung in der Prozesskette dar und verändert die Energiebedarfsstruktur, da Strom als Energieträger im Elektrolichtbogenofen genutzt wird (vgl. Abschnitt 5). Zusätzlich muss dem Eisenschwamm bei vollständigem Einsatz von Wasserstoff als Reduktionsmittel bei der metallurgischen Schmelzarbeit im Lichtbogenofen ein Kohlenstoffträger hinzugefügt werden, um aus dem Eisen Stahl herzustellen. Hierzu können auch regenerative Kohlenstoffträger verwendet werden. [31–33].

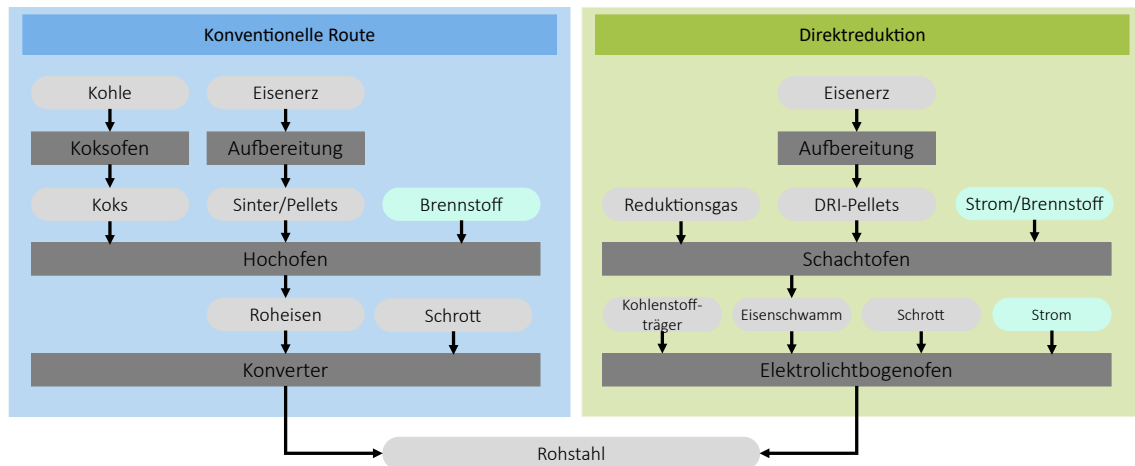


Abbildung 6: Vergleich der Herstellungsrouten zur Stahlerzeugung [32]

3.4 Konkurrenztechniken

Es gibt weitere Möglichkeiten, Stahl CO₂-arm herzustellen. Hierbei gibt es sowohl alternative Routen wie die Wasserstoff-Direktreduktion + Schmelzofen + Einblaskonverter (H₂DRI+SAF+BOF) oder die Hochofenroute + Carbon Capture (CC), aber auch neue, innovative Ansätze wie die Eisenerzelektrolyse. Im Folgenden werden diese Konkurrenztechniken vorgestellt und hinsichtlich ihrer Anwendungspotentiale und Perspektiven analysiert.

3.4.1 Wasserstoff-Direktreduktion + Schmelzofen + Einblaskonverter

Die Route mit Schachtofen in Kombination mit einem Schmelzofen wird von thyssenkrupp im Rahmen des Projekts tkH2Steel entwickelt und soll eine Alternative zur konventionellen Hochofenroute bieten, ohne auf die vollständige Umstellung auf EAFs angewiesen zu sein. Anstelle des EAFs wird das heiße DRI direkt in einen speziellen Schmelzofen, dem SAF (Submerged Arc Furnace), zugeführt. Nach dem SAF wird das flüssige Roheisen einem konventionellen Konverter zugeführt.

Im SAF wird das DRI aufgeschmolzen, da für den Betrieb des Konverters flüssiges Roheisen als Einsatzmaterial erforderlich ist. Zusätzlich werden im SAF unerwünschte Begleitelemente aus der Schmelze entfernt und in die Schlacke überführt. Durch die Behandlung im SAF sind die Anforderungen an die eingesetzten Eisenerze im vorgelagerten Schachtofen niedriger, sodass günstigere Erze verwendet werden können. Die entstehende Schlacke aus dem SAF ähnelt der des Hochofenprozesses und kann entsprechend in der Zementindustrie weiterverwendet werden. Um die optimale Funktionalität des BOF zu gewährleisten, wird das geschmolzene Eisen zusätzlich mit Kohlenstoff angereichert, um einen Kohlenstoffgehalt von 4,7 % zu erreichen, der für den Konverterbetrieb notwendig ist. Der SAF weist derzeit einen Energiebedarf von circa 1,9 GJ elektrische Energie pro Tonne Rohstahl auf. Bis 2050 wird eine Effizienzsteigerung von über 40 % erwartet. Darüber hinaus benötigt der Prozess circa 0,8 GJ Erdgas je Tonne

Rohstahl, das für die Vorwärmung des Materials eingesetzt wird. Der Konverter erfordert zusätzliche 0,8 GJ Energie pro Tonne Rohstahl. [4, 34]

Ein wesentlicher Vorteil der H₂DRI+SAF+BOF-Route liegt in den geringeren Anforderungen an das Einsatzmaterial. Wird das DRI im SAF+BOF eingeschmolzen und weiterverarbeitet, sind die Anforderungen an das Einsatzmaterial geringer, da die Gangminerale im Schmelzprozess entfernt werden. Neuere Untersuchungen zeigen, dass ab einem geringeren Eisengehalt die Schmelzkosten im H₂DRI+SAF+BOF Prozess geringer sind als im H₂DRI-EAF -Prozess [35–37].

Ein weiterer Vorteil der H₂DRI+SAF+BOF-Route liegt in der Möglichkeit, bestehende Konverter und nachgelagerte Anlagen wie Stranggießanlagen weiterzunutzen. Diese Aggregate sind auf die hohen Abstichmengen eines Hochofens ausgelegt, die in dieser Größenordnung von EAFs nicht erreicht werden können. Thyssenkrupp strebt außerdem eine hohe Flexibilität an, indem der BOF sowohl mit wasserstoffbasiertem DRI als auch mit Roheisen aus konventionellen Prozessen betrieben werden kann. [4, 24, 34]

Trotz der Perspektiven sind einige Herausforderungen zu bewältigen. Bislang existieren keine elektrischen SAF-Anlagen dieser Größenordnung [4]. Thyssenkrupp plant, diese Lücke zu schließen, indem ab 2026 eine Anlage mit einer Kapazität von 2 Mio t Rohstahl pro Jahr in Betrieb genommen wird. Neben der technologischen Entwicklung sind auch Effizienzsteigerungen bei Energieverbrauch und Betriebskosten erforderlich, um die Wettbewerbsfähigkeit der Route weiter zu verbessern [4, 24].

3.4.2 Konventioneller Hochofen + CC

Eine weitere Konkurrenztechnik ist die Integration von CC-Techniken in bestehende Stahlwerke. Dabei werden zusätzliche Aggregate zur Abscheidung und Speicherung von CO₂ installiert. Diese ermöglicht die nachträgliche CO₂-Abtrennung (Post-Combustion) aus den Abgasströmen bestehender Anlagen, ohne den primären Produktionsprozess grundlegend zu verändern.

Die größten Scope-1-CO₂-Quellen eines integrierten Hüttenwerks sind:

- Kokerei (10-20 %)
- Sinteranlage (10-15 %)
- Hochofen (60-70 %)
- Konverter (7- 12 %) [5, 38]

Darüber hinaus existieren kleinere Emissionsquellen wie der Strangguss oder das Walzwerk, bei denen ebenfalls eine Abscheidung denkbar ist. [4]

Die erreichbare Abscheidequote wird durch die Umsetzbarkeit der CO₂-Abscheidung aus den Prozessgasen des Hüttenwerks geprägt. Dabei sind zwei technische Herausforderungen hervorzuheben. Zum einen ist die Abgasführung aufgrund der

räumlich verteilten Entstehungsorte komplex, da Emissionen häufig nicht am Ort ihrer Entstehung, sondern an anderen Aggregaten freigesetzt werden. Ein Beispiel hierfür ist Hochofengas, das im Kraftwerk verbrannt und erst dort emittiert wird. Des Weiteren unterscheiden sich die anfallenden Gasströme in ihrer Zusammensetzung, insbesondere im CO₂-Gehalt (9-30 % [39]). Dies macht entweder mehrere Abscheideanlagen oder eine Zusammenführung der Ströme nötig. Auch wenn die Hauptemissionsquellen in der Praxis häufig vergleichbare Randbedingungen hinsichtlich CO₂-Konzentration und Druckniveau aufweisen, führt insbesondere die Verteilung der Quellen zu erhöhter technischer Komplexität und entsprechenden Investitionskosten. [39]

Die Implementierung einer CC-Anlage beeinflusst den Energiebedarf der Stahlwerke. Der konventionelle Prozess erfordert für die Produktion von einer Tonne Rohstahl 19,7 GJ Brennstoff und 0,7 GJ elektrische Energie. Eine elektrisch betriebene CCS-Anlage erhöht den Strombedarf um weitere 2,0 GJ pro Tonne Rohstahl. [1, 4, 5]

Die meisten Untersuchungen von Carbon Capture Techniken zielen aktuell auf die Anwendung in Kraftwerken ab und sind dementsprechend auf die spezifischen Abgase dieser ausgelegt. Während CO₂-Abscheidung mittels Aminwäsche bereits auf TRL 9 entwickelt und in Erdgas- sowie Düngemittelanlagen kommerziell genutzt wird, existieren für die Eisen- und Stahlindustrie bisher keine Anwendungen. Keine der Techniken zur CO₂-Abscheidung ist bisher in der Eisen- und Stahlindustrie kommerziell verfügbar. Die Techniken haben nach der Untersuchung von Perpiñán et al [39] unterschiedliche TRL erreicht:

- Post-Combustion mittels chemischer Absorption: 2
- Post-Combustion mittels Membranen: 4
- Calcium-Looping-Verfahren: 2-3
- Chemical-Looping-Verfahren: 3
- Oxyfuel-Hochofen mit Topgas-Recycling: 2
- Pre-Combustion mittels chemischer Absorption: 3
- Pre-Combustion mittels physikalischer Adsorption: 3
- Pre-Combustion mit Membranen: 2-3
- Sorptionsverstärkte Wassergas-Shift-Reaktion: 3

Zwar bietet die CC-Technik den Vorteil, in bestehende Anlagen integriert werden zu können, jedoch erfordert sie den Aufbau einer geeigneten Infrastruktur, um das abgeschiedene CO₂ entweder vor Ort zu nutzen oder sicher zu externen Lagerstätten oder Nutzenden zu transportieren. Die Umsetzung solcher Projekte hängt entscheidend von der Verfügbarkeit von Techniken, wirtschaftlicher Machbarkeit sowie geeigneter regulatorischer Rahmenbedingungen ab. Bisher liegen von deutschen Stahlherstellern

keine öffentlichen Informationen vor, ob die CC-Techniken eingesetzt werden soll. [4, 13, 40]

3.4.3 Eisenerzelektrolyse

Die Elektrolyse von Eisenerz stellt eine weitere Technik dar, um Eisen ohne direkte CO₂-Emissionen herzustellen. Es existieren zwei Arten: die Niedertemperaturelektrolyse bei Temperaturen zwischen 60 und 130 °C und die Hochtemperaturelektrolyse bei circa 1600 °C. Bei der Niedertemperaturelektrolyse wird Eisenerz in einer alkalischen Lösung, typischerweise Natronlauge (NaOH), aufgelöst. Die gelösten Eisenionen werden an der Kathode abgeschieden und anschließend im EAF zu Rohstahl weiterverarbeitet. Der Prozess bietet theoretisch eine höhere Energieeffizienz, da elektrische Energie direkt für die Reduktion eingesetzt wird und geringere Wärmeverluste auftreten. Die IEA schätzt den TRL dieser Technik auf 4 ein [1]. [5, 41–43]

Im von der EU geförderten Projekt IERO („Iron production by electrochemical reduction of iron oxide for high CO₂-mitigation“) wurde die Eisenerzelektrolyse untersucht. Das Projekt lief von 01.07.2013 bis 30.06.2014 und es nahmen diverse Partner aus Industrie und Forschung teil, darunter ArcelorMittal, TATA Steel Niederlande, Électricité de France R&D, SINTEF Materials and Chemistry sowie verschiedene europäische Universitäten und Forschungszentren. Im Rahmen des Projektes wurden sowohl die Niedertemperaturelektrolyse, als auch die Hochtemperaturelektrolyse untersucht. Hierbei wurde eine Pilotanlage für die Niedertemperaturelektrolyse entwickelt, die die Machbarkeit auf TRL 4 nachwies. [43, 44]

Nachfolgend verfolgte im Rahmen des Horizon 2020 Programms das Projekt SIDERWIN das Ziel, die Elektrolyse auf einen TRL von 6 zu heben. Das Projekt lief von April 2022 bis März 2023 und wurde unter der Koordination von ArcelorMittal in Zusammenarbeit mit elf internationalen Partnern umgesetzt. Im Rahmen des Projektes wurde eine Pilotanlage entwickelt, die Eisen mit einem Reinheitsgrad von bis zu 98,7 % mit einer faradayischen Effizienz von 90 % produzieren kann. Die Anlage wurde 2021 gebaut und verfügt über eine Kapazität von 100 kg Stahl pro Jahr. ArcelorMittal kündigte an, gemeinsam mit John Cockerill, einem Maschinenbauunternehmen im Bereich Stahl, die weltweit erste kommerzielle Eisenerzelektrolyseanlage zu bauen. Der Produktionsstart ist für das Jahr 2027 geplant mit einer Kapazität zwischen 40.000 t und 80.000 t/pro Jahr [45]. Sobald die Funktionalität der Anlage nachgewiesen ist, soll die Kapazität auf 300.000 t bis 1 Mio t erweitert werden. [46, 47]

Die Hochtemperaturelektrolyse nutzt die elektrochemische Reduktion von Metalloxiden, die in einem Elektrolyten aus einer Mischung geschmolzener Oxide gelöst sind. Dabei werden hohe Temperaturen erreicht, die den Schmelzpunkt des jeweiligen Metalloids überschreiten, um die vollständige Auflösung und Reaktionsfähigkeit des Oxids zu gewährleisten. Bei Einsatz inerter Anoden ist das einzige entstehende Nebenprodukt O₂. Bisher gibt es wenige Informationen über die Schmelzflusselektrolyse mit Eisenerz,

jedoch scheint diese mit 4 MWh/t Stahl einen etwas höheren Strombedarf aufzuweisen als die Direktreduktion mit Wasserstoff [5]. Eine wesentliche Herausforderung ist die Entwicklung von inerten Anoden, die den hohen Temperaturen und der korrosiven Umgebung standhalten. Die IEA schätzt den TRL der Schmelzflusselektrolyse auf 4 ein [1]. Es gibt bisher ein Unternehmen, das plant, diese Technik in Zukunft kommerziell zu betreiben. Das US-amerikanische Unternehmen Boston Metal wurde im Jahr 2013 gegründet und nahm 2022 eine Elektrolysezelle mit der elektrischen Stromstärke von 25.000 Ampere in Betrieb, was der Schwelle zur industriellen Größe entspricht. Die Kommerzialisierung der Technik ist laut Boston Metal für das Jahr 2026 geplant. [48]

Beide Elektrolysearten erfordern den Bau neuer Anlagentypen und entsprechender Infrastruktur, die sich deutlich von den aktuellen Produktionsverfahren unterscheiden. Aktuell sind die Produktionsverfahren auf Hochöfen mit Kapazitäten von mehreren Millionen Tonnen pro Jahr ausgelegt. Im Gegensatz dazu sind die Anlagen der Elektrolyse kleiner und könnten zusätzlich modular aufgebaut werden. Dies würde eine Stahlproduktion im kleineren und dezentralen Maßstab ermöglichen. Da beide Techniken jedoch in einem geringeren Entwicklungsstadium sind, ist unsicher, welche Rolle sie in Zukunft einnehmen werden. Aktuelle Modellierungsstudien berücksichtigen die Elektrolyse in ihren Szenarien nicht. [5]

3.4.4 Alternative Direktreduktionsverfahren

Neben dem gasbasierten Schachtofenverfahren existieren verschiedene alternative Direktreduktionsverfahren, die sich hinsichtlich Reaktortyp, Temperaturbereich, Reduktionsmittel und Skalierbarkeit unterscheiden. Zu den wichtigsten Varianten zählen Wirbelschichtverfahren, drehrohrofenbasierte Prozesse sowie kombinierte Reduktions- und Schmelzprozesse wie das Corex-Verfahren.

Bei Wirbelschichtverfahren erfolgt die Reduktion des Eisenerzes in einem System mehrerer aufeinanderfolgender Wirbelschichten (Wirbelschichtkaskaden) bei Temperaturen bis zu 800 °C [49]. Ein bekanntes Beispiel ist das FINMET-Verfahren, das auf dem FIOR-Prozess basiert und seit den 1960er Jahren entwickelt wurde. Im Jahr 2002 wurde eine kommerzielle FINMET-Anlage mit einer Jahreskapazität von etwa 1 Mio t errichtet (zum Vergleich: Schachtofen circa 2,5 Mio t). Als Einsatzstoff dient fein gemahlenes Eisenerz. Trotz technischer Fortschritte konnte sich das Verfahren bisher nicht durchsetzen. Zu den wesentlichen Herausforderungen zählen die Prozesssteuerung, eine vergleichsweise geringe Ausbeute sowie die Neigung des Materials zur Verklumpung während des Reduktionsprozesses. [10]

Ein weiterer Ansatz ist die kohlebasierte Direktreduktion in Drehrohr- oder Drehherdöfen. Diese Verfahren arbeiten bei deutlich höheren Temperaturen:

- Drehrohrofenprozesse wie SL/RN oder der DRC-Prozess erreichen Betriebstemperaturen von bis zu 1100 °C

- Im Fastmet-Verfahren erfolgt die Reduktion im Drehherdofen zwischen 1250 °C und 1350 °C.

Beim Fastmet-Verfahren werden selbstreduzierende Pellets eingesetzt, die aus einer Mischung von Eisenerzkonzentrat, Kohlenstoffträger (Kohle oder Koks) sowie Bindemitteln hergestellt werden [49]. Die Pellets durchlaufen den Ofen kontinuierlich und werden dabei thermisch behandelt, sodass metallisches Eisen entsteht. Verglichen mit dem Schachtofenverfahren weisen diese Techniken eine deutlich geringere Produktionskapazität auf. Die Kapazität des Drehrohrföhrerprozesses beträgt bis zu 10.000 t pro Jahr [50]. Weiterhin wurden bisher sehr wenige Untersuchungen zur Reduktion des CO₂-Fußabdrucks in diesen Verfahren gefunden [51]. [52, 53]

Das Corex-Verfahren, in den 1970er Jahren von der Voestalpine entwickelt und heute im Portfolio von Primetals Technologies, stellt ein alternatives Schmelzreduktionsverfahren dar. Es kombiniert die Direktreduktion und das Schmelzen in zwei räumlich getrennten Reaktoren: dem Reduktionsschacht und dem Schmelzvergaser. Im Reduktionsschacht wird stückiges Eisenerz oder eine Mischung aus Pellets und Stückerz durch ein im Gegenstrom geführtes Reduktionsgas zu DRI reduziert. Dieses direkt reduzierte Eisen wird anschließend über Förderschnecken in den Schmelzvergaser überführt. Dort erfolgen die vollständige Reduktion, das Schmelzen des Eisens sowie weitere metallurgische Reaktionen. [54]

3.5 Patentanalyse

Die Patentanalyse wird in eine qualitative und quantitative Recherche unterteilt.

3.5.1 Quantitative Patentrecherche

Patente im Bereich der Direktreduktion lassen sich über die Patentklassifikation C21B 13/02 identifizieren, welche spezifisch die Herstellung von Eisen in Schachtfoben betrifft. Eine Analyse transnationaler Patentfamilien, die sowohl europäische als auch internationale Anmeldungen umfassen, ermöglichen eine umfassende Bewertung der Innovationslandschaft.

Im Folgenden wird die Entwicklung der Patentanmeldungen zur Direktreduktion von Stahl über den Zeitraum 2000 bis 2022 betrachtet (vgl. Abbildung 7). Es werden sowohl die Gesamtzahl der Patentanmeldungen als auch die spezifischen Anmeldungen, die sich auf Schachtfoben beziehen, dargestellt. Die Gesamtzahl der Patentanmeldungen bleibt bis 2017 konstant mit leichten Schwankungen. Ab 2018 ist ein signifikanter Anstieg in der Anzahl der Gesamtanmeldungen feststellbar, der im Jahr 2021 mit 119 Anmeldungen seinen Höhepunkt erreicht. Die Anzahl der Patentanmeldungen, die spezifisch Schachtfoben betreffen, bleibt ebenfalls über die Jahre 2000 bis 2017 konstant und niedrig im Vergleich zur Gesamtzahl der Anmeldungen. Ab 2018 ist ein Anstieg der Anmeldungen zu beobachten, der im Jahr 2021 mit einem Wert von 44 seinen Höhepunkt erreicht.

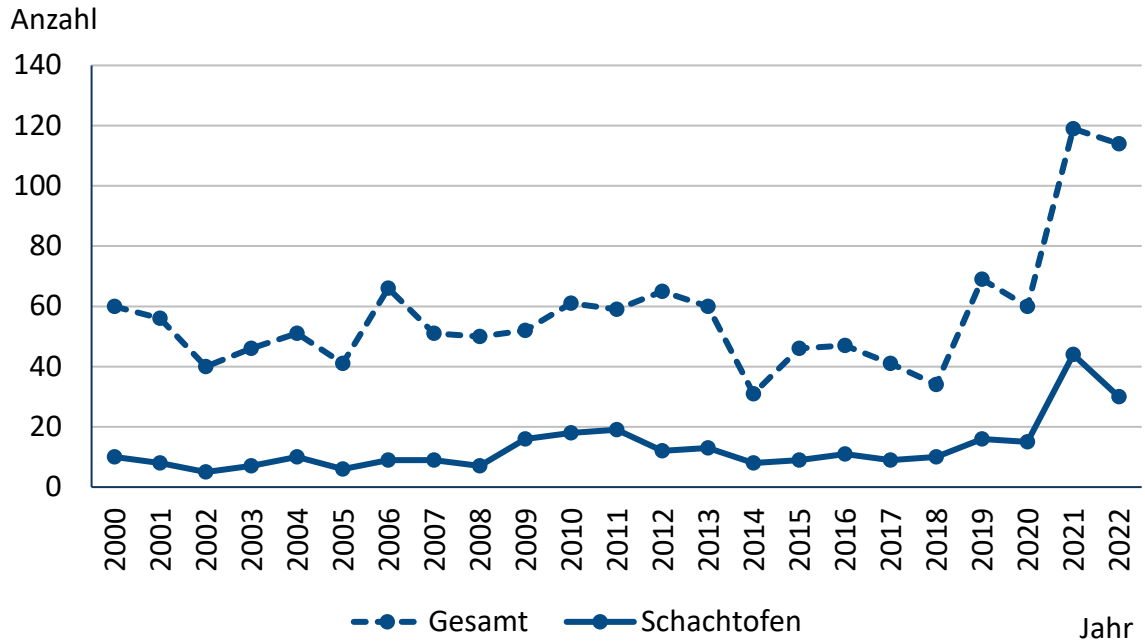


Abbildung 7: Transnationale Anmeldungen zur Direktreduktion von Stahl

Laut den ermittelten Daten führen Japan und die USA mit jeweils 32 Anmeldungen im Zeitraum 2015-2022, gefolgt von Schweden (19), Deutschland (18) und China (14) (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Wichtigste Anmelde­länder für die Direktreduktion von Stahl in Schach­tofen, 2015-2022

Land	Patentanmeldungen
Japan	32
USA	32
Schweden	19
Deutschland	18
China	14
Österreich	11
Frankreich	10
Italien	8

Die meisten Anmeldungen sind hierbei von JFE Steel (Stahlproduktionsunternehmen aus Japan), Hybrit Development AB (Schwedisches Joint Venture in Besitz von LKAB, Vattenfall und SSAB), Midrex Technologies (Anlagenbauer, USA), Arcelormittal (Stahlhersteller, Luxemburg) und Primetals Technologies Austria GmbH (Stahlproduzent, Österreich).

Tabelle 2: Wichtigste Patentanmelder für Direktreduktion von Stahl in Schachtofen, 2015-22

Patentanmelder	Anzahl
JFE STEEL CORP	18
HYBRIT DEV AB	14
MIDREX TECHNOLOGIES INC	14
ARCELORMITTAL	10
PRIMETALS TECHNOLOGIES AUSTRIA GMBH	8
KOBE SEIKO SHO KK	7
POSCO	7
DANIELI & C OFF MEC SPA	5
HYL TECHNOLOGIES SA DE CV	5
KOBE STEEL LTD	5
THYSSENKRUPP STEEL EURO AG	5
WURTH SA PAUL	5

Ergänzend zur Patentklassifikation C21B 13/02 wird Midrex Technologies aufgrund seiner Bedeutung als Anlagenbauer im Bereich Direktreduktion gesondert betrachtet. Abbildung 8 zeigt die länderspezifische Verteilung der Midrex Patentanmeldungen unter Berücksichtigung Deutschlands im Zeitraum 2015 bis 2024. Es wird deutlich, dass die USA über den gesamten Zeitraum hinweg eine zentrale Rolle einnehmen. Besonders ab 2022 ist eine deutliche Zunahme der Anmeldungen erkennbar. Neben den USA treten insbesondere PCT Anmeldungen sowie Anmeldungen beim Europäischen Patentamt hervor. Deutschland weist dazu nur eine geringe, aber sichtbare Anzahl an Anmeldungen auf, insbesondere in den Jahren 2022 bis 2024.

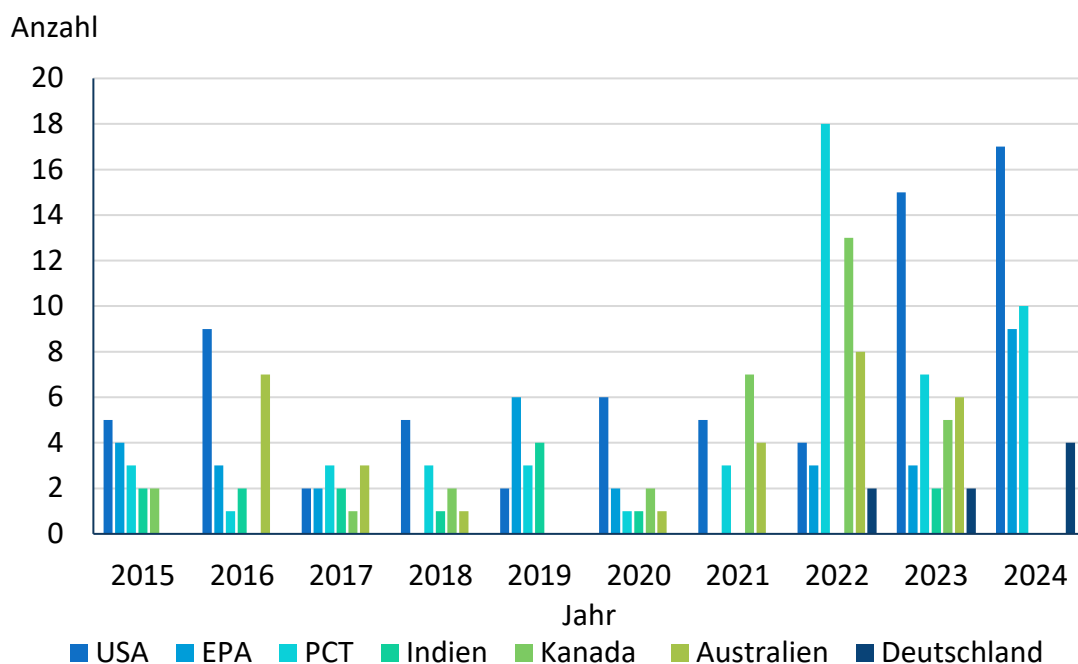


Abbildung 8: Midrex Länderaufteilung mit Deutschland

3.5.2 Qualitative Recherche

In der qualitativen Recherche wird untersucht, welche technischen Innovationen in den betrachteten Patenten thematisiert werden. Der genutzte search string für qualitative Analyse nutzt hierbei die internationale Patentklassifikation und die Klasse C21B13, die Patente im Bereich der direkten Reduktion von Eisen umfasst. Die Analyse konzentriert sich dabei ausschließlich auf „Midrex“ als Patentanmelder, um die Recherche einzugrenzen. Zusätzlich wurde im Text nach „Wasserstoff“ oder „Direktreduktion“ und deren englischen Äquivalenten gesucht. Durch die Eingrenzung auf „single family member“ wird statt jeder einzelnen Patentveröffentlichung nur die patent family gezählt, also die Gruppe von Patenten, die denselben Erfindungsgegenstand in verschiedenen Ländern schützen. Mit der Eingrenzung der Veröffentlichung auf den Zeitraum von 2015 bis 2024 betraf die Trefferzahl 20 Veröffentlichungen (Stand Dezember 2024). Die wichtigsten technischen Entwicklungen betreffen die Wieder- und Weiterverwendung des Kuppelgases, die Anpassung des Reformers bei Zumischung von Wasserstoff, der Vorwärmung und Weiterverwendung bei reinem Wasserstoff und den Einfluss der Wasserstoffnutzung auf den Energiebedarf des anschließenden EAF.

Wieder- und Weiterverwendung Kuppelgas

Die Patente beschäftigen sich vorrangig mit der Wieder- und Weiterverwendung des beim Reduktionsprozess entstehenden Kuppelgases. Dieses Kuppelgas wird in Kombination mit Basic Oxygen Furnace Gas (BOFG) und Koksofengas (COG) innerhalb der Prozessanlage verwendet. Alle drei Gasgemische enthalten relevante Anteile an CO und H₂ sowie teilweise CH₄. Nach der Aufbereitung des Gases werden sie dem frischen Reduktionsgas des Midrex Reformers beigemischt. Die untersuchten Patente fokussieren sich auf diesen Prozess und zeigen Möglichkeiten zur Integration dieses Prozessgases auf. Neben der stofflichen Wiederverwertung kann ein Teil der Gasströme zudem als Brennstoff für die Vorwärmung des Reduktionsgases oder des Gases in der Übergangszone des Schachtofens zur Einstellung des Kohlenstoffgehalts verwendet werden. (vgl. US20130312571, US20160017445, US20160083811, US20160168653)

Anpassung am Reformer bei Zumischung von Wasserstoff

Bei auf Erdgas ausgelegten Reformern ist eine strikte Einhaltung der Prozessparameter, insbesondere hinsichtlich der Menge und Zusammensetzung des eintretenden Gases erforderlich. Bereits geringe Abweichungen können zu einer Deaktivierung und Zersetzung der verwendeten Katalysatoren führen. Wird dem zu reformierenden Gas Wasserstoff beigemischt, entsteht das Risiko der Kohlenstoffablagerungen. Die erhöhte Menge an H₂ verschiebt das chemische Gleichgewicht der Reaktion, sodass sich elementarer Kohlenstoff bildet und im Reformer ablagert. Um das Gleichgewicht einzustellen und die Kohlenstoffbildung zu verhindern, wird zusätzlich Wasserdampf zugegeben. Wird die Menge des zugegebenen Wasserdampfes an das bestehende H₂-CH₄-Verhältnis im Reformer angepasst, ist es möglich, einen variablen Anteil an Wasserstoff dem Reformingprozess zuzuführen. (Vgl. US20210095354).

Vorwärmung und Wieder-/ Weiterverwendung des Reduktionsgases bei reinem Wasserstoffeinsatz

Eine weitere Herausforderung, die in den Patenten adressiert wird, ist die Temperatur des Reduktionsgases beim Eintritt in den Schachtofen. Die Reduktionsreaktion mit Wasserstoff ist endotherm, weshalb gewährleistet werden muss, dass ausreichend Wärme über den Reduktionsgasstrom eingebracht wird. Typischerweise werden Vorwärmeinheiten brennstoffbasiert betrieben. Der Einsatz einer elektrischen Vorwärmeinheit wird in einem Patent angesprochen. Diese Technik bietet das Potential, die Energieeffizienz zu steigern und mit erneuerbarer Energie betrieben zu werden (Vgl. US20230052345). Zusätzlich wird in einem Patent die Verwendung eines SOEC-Elektrolyseurs beschrieben. Wird dieser direkt dem Schachtofen vorgeschaltet, besteht die Möglichkeit, einen vorgewärmten Wasserstoffstrom (Temperatur von 500-800 °C) bereitzustellen. Dieser muss zusätzlich auf das notwendige Temperaturniveau des Schachtofens (800-1000 °C) angehoben werden. Weiterhin bietet die SOEC die Möglichkeit, das entstehende Kuppelgas aus dem Schachtofen als Einsatz zu nutzen (vgl. US20200385827).

Einfluss von reinem Wasserstoffeinsatz auf den Energiebedarf im EAF

Da im Reduktionsgas einer vollständig mit Wasserstoff betriebenen Anlage kein Kohlenstoff enthalten ist, entsteht ein nahezu kohlenstofffreies DRI. Dies resultiert in Herausforderungen für die weiteren Verarbeitungsschritte, insbesondere im anschließenden Lichtbogenofen (EAF). Ein geringer Kohlenstoffanteil im DRI führt zu einem erhöhten Energiebedarf im EAF. Um dieser Herausforderung zu begegnen, wird in den Patenten, die sich auf den Einsatz von H_2 fokussieren, das Einbringen eines Kohlenstoffträgers (meist Erdgas bzw. CH_4) für nötig erachtet. Dieser wird jedoch nur in geringeren Mengen in die Übergangszone im Schachtofen eingebracht, um den Kohlenstoffgehalt auf ein Niveau von bis zu 4 % zu bringen (Vgl. US20170009309, US20170058373).

4 Relevanz in Forschung und Entwicklung

4.1 FuE in Deutschland

Wie bereits erläutert, existieren in Deutschland mehrere Pilotprojekte, die auf den Aufbau einer wasserstoffbasierten DRI-Anlage ausgerichtet sind. Im Folgenden werden die Projekte beschrieben.

DRIBE² (Direct reduced iron Bremen Eisenhüttenstadt) ist ein Verbundprojekt zur kohlenstoffarmen Stahlerzeugung, das von ArcelorMittal an den Standorten Bremen und Eisenhüttenstadt durchgeführt wird. Im Rahmen des Projektes werden in Bremen eine DRI-Anlage und ein EAF (2 Mio t Kapazität) erbaut. Zusätzlich werden zwei EAF in Eisenhüttenstadt erbaut. Der Bau der DRI-Anlage wird im Rahmen eines IPCEI-Projektes finanziert. Der Bau der EAF in Bremen und Eisenhüttenstadt wird aus Mitteln des Bundesprogramms „Dekarbonisierung der Industrie“ finanziert. [55, 56]

Die DRI-Anlage in Bremen wird eine Kapazität von 2,4 Mio t Eisenschwamm aufweisen und kann sowohl mit Erdgas, als auch mit Wasserstoff betrieben werden. Das Projekt sieht vor, dass nach Inbetriebnahme der DRI-Anlage jeweils ein Hochofen in Bremen und Eisenhüttenstadt stillgelegt wird. Zusätzlich werden die Sinter-Anlage und der Konverter in Bremen stillgelegt. Dies geschieht voraussichtlich nicht vor 2032. Dabei sollen die Produktionsziele von 3,4 Mio t am Standort Bremen stabil bleiben. Der entstehende Eisenschwamm wird anschließend sowohl im EAF in Bremen, als auch in den zwei EAF in Eisenhüttenstadt weiterverarbeitet. [55, 56]

Weiterhin ist ArcelorMittal Teil des IPCEI Projektes Clean Hydrogen Coastline. Das Projekt hat das Ziel, die Versorgung von DRIBE² mit grünem Wasserstoff sicherzustellen, indem Kapazitäten für die Wasserstofferzeugung und -speicherung aufgebaut und in die entsprechende Infrastruktur integriert werden. Dazu gehört der Bau einer Elektrolyseanlage mit einer Leistung von 50 MW, die die Wasserstoffproduktion gewährleisten soll. Weiterhin wird über das IPCEI-Projekt „Hyperlink“ die Wasserstoffanbindung des Standortes realisiert. [55, 57, 58]

Insgesamt werden für den Umbau der Standorte Bremen und Eisenhüttenstadt circa 2,5 Mrd. € investiert. Die EU-Kommission bezuschusst mit insgesamt 1,273 Mrd. € (985,3 Mio € für Bremen und 287,7 Mio € für Eisenhüttenstadt). Zusätzlich soll die IPCEIFörderung in Bremen 838 Mio. € betragen, die zu 70 % vom Bund und zu 30 % vom Land getragen wird. Der Förderzeitraum erstreckt sich von August 2023 bis Juni 2028, wobei die Finanzierung ausschließlich den Bau der DRI-Anlage in Bremen betrifft. Unterstützt wird das Vorhaben vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des Förderprogramms „Wasserstofftechnologien und -systeme“ (KUEBLL), und das Forschungszentrum Jülich übernimmt die Projektträgerschaft. Weiterhin investiert ArcelorMittal insgesamt 352,6 Mio. €. [55, 56]

ArcelorMittal hat diese Transformationspläne jedoch im Juni 2025 bis auf Weiteres gestoppt und angekündigt, die zugesagten Fördermittel nicht in Anspruch zu nehmen. Als Begründung wurden insbesondere die Marktsituation und die fehlende Wirtschaftlichkeit einer CO₂-reduzierten Stahlproduktion unter den gegebenen Rahmenbedingungen genannt. [7, 59]

Im Rahmen des Projektes SALCOS (Salzgitter Low CO₂ Steelmaking) plant die Salzgitter Flachstahl GmbH, Stahl über die Direktreduktions-Elektrolichtbogenofen-Route zu produzieren. Im Rahmen des Projektes werden eine wasserstofffähige Direktreduktionsanlage, ein Elektrolichtbogenofen und ein Elektrolyseur in Salzgitter errichtet. Die geplante Direktreduktionsanlage hat eine Kapazität von 2 Mio t Stahl pro Jahr und basiert auf der Energiron-Technologie (Energiron ZR Direct Reduction) [60]. Die Fördersumme beläuft sich auf knapp 1 Milliarde Euro, wobei das BMW (bei Bewilligung noch BMWK) 70 % der Finanzierung und das Land Niedersachsen 30 % übernimmt [60, 61]. Zusätzlich investiert die Salzgitter AG 723 Mio € in das Projekt. Der Förderzeitraum erstreckt sich von Juni 2022 bis Dezember 2026. Das Projekt wird im Rahmen des Förderprogramms „Wasserstofftechnologien und -systeme“ (KUEBLL) gefördert, und der Projektträger Jülich fungiert als Projektträger. [62–65]

Im Rahmen des Projekts tkH₂Steel wird eine wasserstoffbetriebene Direktreduktionsanlage (DRI) mit zwei nachgeschalteten Einschmelzern errichtet, die jährlich etwa 2,3 Mio t Roheisen klimaneutral herstellen sollen. Zu Beginn wird die Anlage mit Erdgas betrieben, und sobald ausreichend Wasserstoff verfügbar ist, erfolgt die Umstellung auf den Betrieb mit Wasserstoff. Dabei kommt die MIDREX Flex-Technologie zum Einsatz, die flexibel zwischen Erdgas- und Wasserstoffbetrieb umschalten kann, was eine schrittweise Dekarbonisierung der Produktion ermöglicht [66–68].

Die Fördermittel für dieses Projekt betragen knapp 2 Milliarden Euro, bereitgestellt durch das BMW mit circa 1,4 Milliarden € und der Nordrhein-Westfälischen Landesregierung, die 700 Mio € beisteuert. Das Vorhaben wird im Rahmen des Förderprogramms „Wasserstofftechnologien und -systeme“ (KUEBLL) unterstützt, und der Projektträger Jülich ist als Projektträger verantwortlich. Der Förderzeitraum erstreckt sich von November 2022 bis Juni 2027, und der Produktionsstart ist für 2026 geplant [66–68].

Im Projekt Power4Steel werden der Stahl-Holding-Saar Gruppe (SHS-Gruppe), die aus der Dollinger Hüttenwerke AG, der Saarstahl AG und der ROGESA Roheisen- und Rohstoffgesellschaft Saar mbh besteht, insgesamt 2,6 Milliarden € zur Verfügung gestellt. Diese werden zu 70 % vom Bund und zu 30 % vom Saarland getragen [69]. Im Rahmen des Projektes soll am Standort Dillingen eine Direktreduktionsanlage aufgebaut werden. Zum Bau der Anlage wird die Technik von Midrex verwendet. Zusätzlich werden zwei Elektrolichtbögenöfen errichtet. Produktionsstart soll im Jahr 2027 erfolgen [70].

4.2 FuE im Rahmen des Energieforschungsprogramms

Die Direktreduktion wird in den Energieforschungsprogrammen nur vereinzelt thematisiert. In den ersten beiden EFPs (1977-1980 und 1981-1990) wird angenommen, dass sich Hochofenkoks langfristig kaum durch andere Reduktionsmittel gleichwertig ersetzen lässt. In den darauffolgenden Programmen bleibt die Direktreduktion weitgehend unerwähnt und enthält erst im 7. EFP (2018-2022) wieder eine zentrale Bedeutung.

Die Bedeutung der Stahlproduktion wird hingegen in den meisten Energieforschungsprogrammen hervorgehoben und es lassen sich verschiedene Entwicklungen in der Forschungsförderung nachvollziehen. Zu Beginn steht vor allem die Förderung der Kokserzeugung im Vordergrund. Da in den beiden ersten EFPs davon ausgegangen wird, dass sich Koks langfristig nicht gleichwertig ersetzen lässt, liegt der Fokus der Förderung auf der Verbesserung des konventionellen Herstellungsverfahrens von Koks aus Kohle (Horizontalkammerverfahren) und der Entwicklung eines Verfahrens, in der verschiedene Arten von Kohle als Rohstoff verwendet werden können. Rund 40 % der Steinkohle wird zur Herstellung von metallurgischem Koks verwendet, was die zentrale Rolle dieser Ressource für die Stahlindustrie unterstreicht. In beiden EFPs werden der Kokserzeugung jeweils in den Teilprogrammen *Kohle und andere fossile (Primär-)Energieträger* ein Unterkapitel gewidmet (1. EFP: Kapitel 2.2.1.4, Förderung 24 Mio. DM; 2. EFP 3.1.4).

Im dritten EFP (1991-1995) zeichnet sich eine deutliche Veränderung des Förderschwerpunktes ab. In diesem Programm werden erstmals die negativen Auswirkungen der Nutzung von fossilen Energieträgern im Energiesystem hervorgehoben und explizit auf die Umwelteinflüsse durch die CO₂-Emissionen hingewiesen. Im Bereich der fossilen Energieträger wird festgestellt, dass die massiven Förderungen in der Vergangenheit zu einer raschen Bereitstellung und Verbesserung von Techniken führten. Die finanzielle Ausstattung dieses Programmpunktes wird deutlich herabgesetzt. Zielsetzung ist nun in erster Linie die Entwicklung umweltschonender Techniken. Die Stahlindustrie steht nicht im expliziten Fokus.

Mit dem vierten (1996-2004) und fünften (2005-2010) EFP verschiebt sich der Fokus zunehmend auf die Prozessoptimierung und die Steigerung der Energieeffizienz. Im sechsten EFP (2011-2017) wird festgehalten, dass es gelungen ist, den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen bei gleichzeitiger, leichter Steigerung der Stahlproduktionsmenge zu senken. Die weitere Reduktion des Energieeinsatzes sowie innovative Entwicklungen in der Thermoprozesstechnik sind zentrale Schwerpunkte des Förderprogramms.

Im 7. EFP (2018-2022) ist der effiziente Einsatz sekundärer Energieformen und der Ersatz fossiler Brennstoffe durch erneuerbare Energien ein Schwerpunkt, jedoch wird Wasserstoff hierbei nicht explizit erwähnt. Im Rahmen des 7. EFPs wird das Projekt

H2Stahl, das sich mit der Direktreduktion beschäftigt, gefördert. Es ist das einzige Projekt innerhalb der EFPs, das sich explizit mit der wasserstoffbasierten Direktreduktion beschäftigt und hat einen Förderumfang von insgesamt 37 Mio. € [71].

Das Projekt wurde 2025 allerdings teilweise gestoppt. Teil A und C) wurden gestoppt, Teil B) wird weiterhin fortgeführt.

Das Reallabor H2Stahl bestand aus drei Teilvorhaben:

- A) Forschungsvorhaben für den Wasserstoffeinsatz am Hochofen (2,261 Mio €, thyssenkrupp Steel Europe AG, Laufzeit 08.10.2021 bis 31.12.2028) [72]
- B) Forschungsvorhaben an einer Direktreduktionsanlage für den Pilotbetrieb (15,290 Mio €, VDEh Betriebsforschungsinstitut (BFI), Laufzeit 01.11.2021 bis 31.12.2028) [73]
- C) Dynamische H₂-Versorgung und Netzentwicklung (21 Tsd. €, AIR LIQUIDE Deutschland GmbH, Laufzeit 01.09.2021 bis 30.09.2024) [74]

Im Projektteil A war geplant, den Einsatz von Wasserstoff in einem industriellen Hochofen zu untersuchen. Das als Reduktionsmittel verwendete Koks wird dadurch teilweise ersetzt, sodass eine CO₂-Einsparung von circa 20 % erwartet wurde. Ziel der Forschung war, die Auswirkungen des industriellen Einsatzes von Wasserstoff auf die metallurgischen Prozesse im Hochofen zu analysieren und Parameter für einen effizienten Einsatz von Reduktionsmitteln zu entwickeln. Das Hauptziel bestand darin, Wasserstoff als Brückentechnologie zur Reduzierung von CO₂-Emissionen in bestehende Hochofenanlagen zu etablieren [71, 75, 76]. Aus dem Abschlussbericht zu Projektteil C) geht hervor, dass das Projekt vorzeitig beendet wurde und nicht fortgeführt wird. [77]

Im zweiten Projektteil wird die Stahlherstellung mittels Direktreduktion erforscht. Hierfür wird eine Direktreduktions-Versuchsanlage gebaut, die vom BFI betrieben und wissenschaftlich betreut wird. Dabei erfolgt die Untersuchung des Einsatzes verschiedener wasserstoffreicher Gase, die flexibel genutzt werden, um eine Unabhängigkeit vom begrenzten Wasserstoffangebot zu erreichen. Weiterhin werden unterschiedliche, nicht marktübliche, eisenoxidhaltige Einsatzstoffe und Reststoffe erprobt. Trotz Beendigung der anderen Projektteile, wird dieses Teilprojekt weiter fortgeführt. [72, 76]

Im Projektteil C wurde 2022 die nötige Pipeline zur Versorgung der Anlage mit Wasserstoff gebaut. Dabei wurde das Reallabor in Duisburg an das bestehende Wasserstoffnetzwerk von AIR LIQUIDE im Ruhrgebiet angeschlossen. [74, 77]

Zusätzlich wird in einem anderen Projekt eine nachgeschaltete DRI-Einschmelzanlage entwickelt und gebaut, in der das aus dem Reallabor H2Stahl entstehende DRI eingeschmolzen werden soll. Dies wird durch das Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen mit 6,2 Mio € gefördert. Dieses

Vorhaben ist nicht Teil des Reallabors und wird von thyssenkrupp Steel gemeinsam mit dem BFI durchgeführt. [78, 79]

Weiterhin gibt es den Förderaufruf „Technologieoffensive Wasserstoff“, der verschiedene Projekte zur Nutzung von Wasserstoff in der Stahlproduktion adressiert. Beispiele sind das Projekt „OptiLBO“ zur CO₂-armen Sekundärstahlherstellung durch Substitution von Erdgas mit Wasserstoff im Elektrolichtbogenofen, das Projekt „H₂-DisTherPro“ zur Wasserstoffbeheizung einer Haubenglühanlage sowie „FlexHeat2Anneal“, das die Integration von Wasserstoff in Durchlaufglühanlagen fokussiert. Diese Projekte untersuchen jedoch nicht die Direktreduktion, sondern den Wasserstoffeinsatz in der nachgelagerten Prozesskette. [80, 81]

4.3 Verankerung der Technik im 8. Energieforschungsprogramm

Die Analyse des 8. EFPs (seit 2023) und der dazugehörigen Förderbekanntmachung zeigt, dass die Förderung der Direktreduktion mittels Wasserstoff zur Stahlproduktion nicht explizit im Fokus steht, dennoch relevante Anknüpfungspunkte existieren, die diese Technologie indirekt unterstützen können.

Im Rahmen des 8. Energieforschungsprogramms (EFP) wird die direkte Reduktion von Eisen mittels Wasserstoff sowie die Stahlindustrie insgesamt nicht explizit gefördert. Die einzige Erwähnung erfolgt im Kontext der „Mission Energiesystem 2045“ und dort lediglich unter dem Programmziel 1, das die Verbesserung der Gesamtsystemeffizienz anstrebt. Hierbei spielen die Weiterentwicklung der sektorübergreifenden Modellierung und praxisnahen Planung eine Schlüsselrolle (Abschnitt 2.1). In diesem Kontext wird betont, dass große Energieverbraucher, wie etwa in Stahlwerken, und deren Abwärmepotentiale bei der Entwicklung sektorübergreifender Systemmodelle und Planungsansätze berücksichtigt werden sollen. Dies kann eine indirekte Unterstützung für die Stahlindustrie darstellen, indem die Integration solcher Anlagen in ein effizientes Energiesystem gefördert wird.

Ein weiterer relevanter Ansatz findet sich in der „Mission Energiewerke 2045“, die sich auf die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung fokussiert. Bis 2030 soll die Hälfte der Wärme klimaneutral bereitgestellt werden, wobei fossile Energieträger durch erneuerbare Energien und die Nutzung von Abwärme ersetzt werden sollen. Zudem wird die Senkung des Wärmebedarfs durch Energieeffizienzmaßnahmen angestrebt und eine optimierte Nutzung der Strom- und Wärmeinfrastruktur gefördert. Im Programmziel 2 wird speziell die Wärme- und Kälteversorgung in Industrie und Gewerbe adressiert, mit dem Ziel, diese Bereiche defossilisiert und effizienter zu gestalten. Hierbei ist von besonderer Bedeutung, dass insbesondere die Wärmebereitstellung für Hochtemperaturprozesse, wie sie in der Stahlindustrie vorkommen, auf treibhausgasneutrale Quellen umgestellt werden soll.

In Abschnitt 2.1 *Mittel- und Hochtemperaturprozesse defossilisieren* wird die Entwicklung von Verfahren zur Defossilisierung von Mittel- und Hochtemperaturprozessen gefördert. Dies umfasst insbesondere die Nutzung biogener und synthetischer Brennstoffe, wie Wasserstoff und seine Derivate, bis hin zur Einsatzreife. Diese Maßnahmen können indirekt zur Entwicklung und Implementierung von wasserstoffbasierten Direktreduktionsverfahren beitragen, auch wenn dies nicht explizit als Förderziel genannt wird. Bei der Direktreduktion wird Wasserstoff im Schachtofen streng genommen nicht als Brennstoff verwendet, jedoch muss, wie in Abschnitt 3.1 dargelegt, das Einsatzmaterial vorgewärmt werden, wofür biogene oder synthetische Brennstoffe oder eine Elektrifizierung in Frage kommen.

Insgesamt zeigt sich, dass das 8. EFP zwar keine direkte Förderung der Direktreduktion in der Stahlindustrie vorsieht, jedoch durch die sektorübergreifende Betrachtung und die Fokussierung auf Effizienzsteigerung und Defossilisierungspotenziale indirekt zur Transformation dieser Industrie beitragen kann.

Relevante Aspekte aus der Förderbekanntmachung zum 8. EFP

In der Förderbekanntmachung zum 8. EFP in Abschnitt 2.3.3 *Industrie und Gewerbe* wird beschrieben, dass für Prozesse, bei denen eine strombasierte Prozessführung nicht möglich ist, andere nichtfossile Alternativen erforderlich sind. Alternativen sind grüner Wasserstoff, Biogas, Biomethan oder grüner Ammoniak. Diese Förderung geht über die produktorientierte Innovation hinaus und umfasst die gesamte Produktionslogistik, Wartung, Betriebsführung sowie die Sicherstellung der Versorgungsresilienz an Industriestandorten. Diese Priorisierung alternativer Energieträger schafft eine indirekte Förderung für die Direktreduktion mittels Wasserstoff, da die Stahlproduktion als energieintensiver Sektor auf Hochtemperaturprozesse, die nur schwer elektrifiziert werden können, angewiesen ist. Hierbei sind insbesondere die Vorwärmung des Einsatzmaterials für den DRI-Schachtofen oder der Einsatz von Wasserstoffbrennern im anschließenden LBO zu nennen.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist die Förderung von „Modellprojekten Industrie“, die darauf abzielen, entwickelte Lösungen wie die Nutzung von grünem Wasserstoff direkt in industrielle Prozesse zu integrieren. Diese Modellprojekte weisen einen hohen TRL auf und umfassen die erstmalige Einbindung neuer Technologien in den laufenden Betrieb. Der Fokus liegt dabei auf der Überführung von Forschungsergebnissen in die Praxis und der Skalierung auf industriellen Produktionsmaßstab. Dies könnte auch die Integration von wasserstoffbasierten Direktreduktionsanlagen in die bestehende Stahlproduktion umfassen.

5 Erforderlicher FuE-Bedarf

Im Folgenden wird der erforderliche FuE-Bedarf für die technischen Herausforderungen für die Steigerung des TRL beschrieben.

5.1 Wechsel von Erdgas zu Wasserstoff

Der Übergang von erdgasbasierter Direktreduktion zu rein wasserstoffbasierter Direktreduktion verändert das Reduktionsverhalten im Schachtofen grundlegend. Während in konventionellen Direktreduktionsöfen CO und H₂ parallel als Reduktionsmittel wirken, verschieben sich bei reinem Wasserstoff die Reaktionskinetik und das thermodynamische Gleichgewicht. Untersuchungen zeigen, dass eine Absenkung der H₂-Konzentration durch Erhöhung des CO-Anteils im Gasgemisch den Metallisierungsgrad erhöht. Der Anteil des zur Reduktion genutzten Wasserstoffs lag bei einer Mischung mit 85 Mass.-% H₂ bei 90 % und bei 70 Mass.-% H₂ bei 86 %. Der CO-Verbrauch lag in beiden Fällen bei 100 %. Dies deutet darauf hin, dass die Reduktion über CO thermodynamisch begünstigt ist. [8]

Die Ergebnisse legen nahe, dass Gasgemische von Wasserstoff und CO vorteilhaft gegenüber reinem Wasserstoff sein können. Beimischung mit geringen CO-Anteilen kann den Metallisierungsgrad erhöhen sowie den Wasserstoffbedarf und den Gesamtenergieeinsatz reduzieren. Für die Reduktion von 1 t DRI bei 900 °C zeigt sich, dass ein Prozessgas mit 85 % H₂ und 15 % CO eine vollständige Metallisierung erreicht und dabei 46 kg H₂ erfordert, während eine reine Wasserstoffreduktion 100 kg benötigt [8].

Gleichzeitig wird in anderen Untersuchungen festgestellt, dass Wasserstoff eine höhere Reduktionswirkung aufweist und die Reaktoren anders ausgelegt werden können. Für einen reinen Wasserstoffbetrieb wird diskutiert, ob Schachtofen potentiell kompakter dimensioniert werden können, da der Großteil der Reduktionsreaktionen im oberen Reaktorteil stattfindet. [82]

Insgesamt ergibt sich FuE-Bedarf insbesondere in der Bestimmung optimaler Gaszusammensetzungen, der Auslegung von Gasführung und der Geometrie für den wasserstoffbasierten Betrieb.

5.2 Einsatzmaterial

Die Umstellung von der BF-BOF auf die H₂DRI-EAF Route erfordert eine Anpassung des eingesetzten Eisenerzmaterials. Während im Hochofenprozess das Erz erschmolzen wird und oxidische Verunreinigungen als Gangart über die Schlacke entfernt werden, erfolgt die Reduktion im Schachtofen im festen Zustand. Infolgedessen verbleiben die nicht reduzierbaren Gangminerale, wie Silikate und Oxide von Calcium, Aluminium, Magnesium und Mangan, im DRI und können im anschließenden

Elektrolichtbogenofenprozess zu einer erhöhten Schlackenbildung, Eisenverlust sowie einem gesteigerten Energiebedarf führen. [83–85]

Thermodynamische und experimentelle Untersuchungen zeigen, dass diese Begleitoxide unter typischen Reduktionsbedingungen – selbst bei hohen Temperaturen (z.B. 1673 K) und Überschuss an Wasserstoff – nicht reduziert werden und sich als kugelförmige, nichtmetallische Einschlüsse in der Eisenmatrix ablagern [84]. Trotz zahlreicher Untersuchungen zum Reduktionsverhalten von Hämatit und Magnetit sind die Auswirkungen von Verunreinigungen auf die Reaktionskinetik bislang nicht umfassend erforscht. Erste Erkenntnisse deuten jedoch darauf hin, dass einzelne Oxide wie CaO oder Al_2O_3 die Reduktionsrate positiv beeinflussen können, während MgO abhängig von Konzentration und Reaktionsumgebung sowohl förderlich, als auch hinderlich wirken kann [83].

Für die H_2DRI -EAF-Route ergeben sich daraus klare Anforderungen an das Einsatzmaterial: Zur Sicherstellung einer hohen Reduktionseffizienz und Produktqualität sollten Eisenerze einen Eisenanteil von über 65 % sowie einen möglichst geringen Gangartgehalt aufweisen [86]. Je höher die Eisenqualität, desto geringer der Energiebedarf im Schachtofen. [8]

Derzeit setzt die Stahlindustrie vorrangig auf die Verwendung von hochwertigem Eisenerz in der H_2DRI -EAF-Route [35]. Diese Einschränkungen beim Einsatzmaterial ist ein bedeutender Nachteil dieser Route. Wird das DRI stattdessen im SAF+BOF eingeschmolzen und weiterverarbeitet, sind die Anforderungen an das Einsatzmaterial geringer, da die Gangminerale im Schmelzprozess entfernt werden. [35–37].

Die ökonomischen Auswirkungen der Eisenerzqualitäten auf die Wahl der Prozessroute werden in Abbildung 9 veranschaulicht. Es zeigt sich, dass bei sinkender Erzqualität die Transformationskosten der betrachteten Routen ansteigen, gleichzeitig jedoch die DRI-Kosten abnehmen. Daraus folgt, dass für Eisenerze geringerer Qualität ($\text{Fe} < 67$ Gew. %) die DRI-SAF-BOF Route wirtschaftlich vorteilhaft sein kann, während für höherwertige Erze die DRI-EAF-Route wirtschaftlich besser geeignet erscheint. Die Prozesskosten (für elektrische Energie, Zuschlagstoffe und Gase) sind für niederwertige Erze höher, jedoch sind die Herstellungskosten geringer [37].

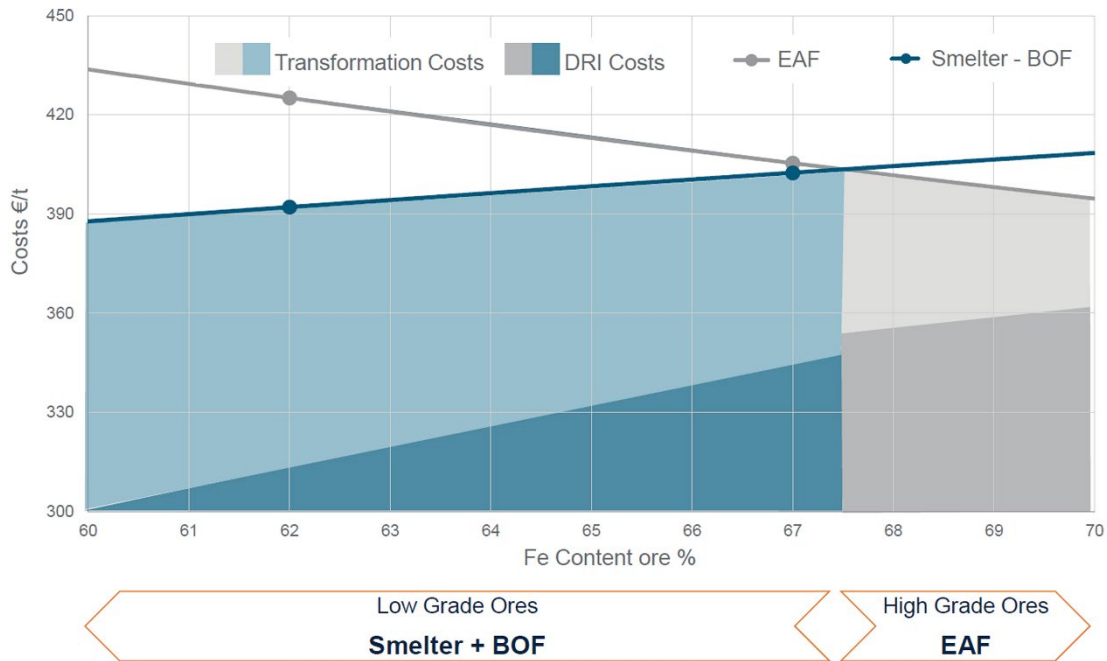


Abbildung 9: Transformationskosten der DRI-EAF und DRI-SAF-BOF-Routen in Abhängigkeit von der Qualität des Einsatzmaterials nach Wimmer [37]

In bisherigen Untersuchungen zeigt sich, dass der Einsatz von Eisenpellets im Schachtofen von Vorteil ist. Vorteile von Pellets sind ihre homogene Form und hohe mechanische Stabilität. Der Vergleich von Pellets, Agglomeraten und Stückerzen zeigt, dass Pellets bei Temperaturen unterhalb von 800 °C die höchste Reduktionsgeschwindigkeit aufweisen. Bei höheren Temperaturen ist die Reaktivität von Agglomeraten höher aufgrund des höheren Magnetitanteils im Material. Stückerze zeigen aufgrund ihrer geringen Porosität und Oberfläche eine vergleichsweise niedrige Reduktionsrate.

5.3 Vorwärmung Wasserstoff/Umgang mit endothermer Reaktion

Da die Reduktionsreaktion von Eisenerz mit Wasserstoff endotherm ist, muss dem Prozess thermische Energie zugeführt werden [87]. Eine Option ist die Vorwärmung des Reduktionsgases vor dem Eintritt in den Reaktor. Dabei ist die Gastemperatur prozesseitig begrenzt. Eine Temperaturerhöhung über 1473 °C [88] führt dazu, dass das DRI erweicht, das Material aneinander oder an der Reaktorwand backt und die Gasdurchströmung beeinträchtigt wird.

Zur Bereitstellung dieser Wärme wird derzeit die elektrische Vorheizung des Prozessgases untersucht. Kanthal und Danieli arbeiten an einem elektrischen Prozessgaserhitzer für Wasserstoff, Erdgas und Mischgase, der Gastemperaturen von 1100 °C erreichen soll. Die Technik wird im Pilotmaßstab erprobt und wird nun in industrielle Anwendung skaliert. Das zu erhitzende Prozessgas strömt durch Rohre, die sich innerhalb eines Druckbehälters befinden und durch elektrische Widerstandsheizelemente erwärmt werden.

Derzeit wird die Technik in zwei bedeutenden Projekten weiterentwickelt und erprobt:

- EU-Projekt Hydra (RINA CSM, Italien): Inbetriebnahme eines 140 kW Pilotheizkörpers in einer 30 m DRI-Pilotanlage, geplant für März 2026
- Emirates Steel (Abu Dhabi, VAE): Lieferung und Installation eines 1,3 MW Demonstrationsheizkörpers in einer kommerziellen DRI-Produktionsanlage, geplant für Mai 2026 [82, 89, 90]

6 Energiewirtschaftliche Bedeutung und weitere Effekte

Es gibt bereits Untersuchungen, die prognostizieren, wie sich die Stahlproduktion in Deutschland entwickelt. In diesen Prognosen wird dargestellt, wie eine Dekarbonisierung der Stahlproduktion möglich ist und welche Auswirkungen die Veränderung der Technik haben wird. Für Deutschland sind insbesondere die Szenarien von prognos/Wuppertal Institut [4], SCI4climate.NRW [40] und der Projektionsbericht des Umweltbundesamtes [91] von hoher Relevanz. Weiterhin gibt es eine Dissertation von Kreth, die sich ausgehend von der Transformation eines Hüttenwerks mit der Integration in das energiewirtschaftliche System beschäftigt [13].

In den Szenarien von prognos und dem Wuppertal Institut werden zwei verschiedene Szenarien entwickelt: Entwicklungspfad A „Wenig Kooperation“ und Entwicklungspfad B „Viel Kooperation“. Im Entwicklungspfad A wird die Stahlproduktion weitgehend in Deutschland gehalten, um Importabhängigkeit zu minimieren, wobei Energie- und Materialeffizienz sowie Recyclingquoten verbessert werden sollen. Die Nutzung von CO₂-Abscheidung und inländischer Biomasse wird maximiert, um begrenzte Wasserstoffimporte – überwiegend aus der EU – auszugleichen, wobei die Transformation auf Direktreduktionsverfahren durch fehlende inländische Kapazitäten für grünen Wasserstoff eingeschränkt ist. Diese Strategie beeinträchtigt jedoch die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Stahlindustrie, da Schrottqualitäten unzureichend sind und Preisvorteile durch die limitierte Importstrategie entfallen. [4]

Im Entwicklungspfad B „Viel Kooperation“ wird die Stahlindustrie durch hohe internationale Zusammenarbeit geprägt, wobei Importe von grünen Energieträgern, Rohstoffen und Biomasse eine zentrale Rolle spielen und europaweite Energie- und CO₂-Netze den Einsatz von CO₂-Abscheidung erleichtern. Die Stahlproduktion fokussiert sich auf Direktreduktionsverfahren, ergänzt durch einige Hochöfen mit CO₂-Abscheidung, wobei die Effizienzsteigerungen auf heutigem Niveau bleiben. Diese Strategie fördert die Wettbewerbsfähigkeit und erzielt eine höhere Akzeptanz, trotz gestiegener Abhängigkeit von ausländischen Ressourcen. [4]

In dem Szenario von SCI4Climate wird davon ausgegangen, dass Deutschland seine klima- und energiepolitischen Ziele erreicht, einschließlich der Reduktion von Treibhausgasemissionen und des Ausbaus erneuerbarer Energien. Zudem wird erwartet, dass Europa und der Rest der Welt ihre Klimaschutzanstrengungen verstärken werden. Die CO₂-Abscheidung, -speicherung und -transport wird breit akzeptiert. Weiterhin wird angenommen, dass Deutschland seine industrielle Basis trotz hoher Energiekosten erhalten kann. Bezüglich der Stahlindustrie beschreibt das Szenario von SCI4Climate.NRW einen Transformationspfad, in dem die Hochofenroute in Deutschland vollständig aufgegeben und die Stahlproduktion überwiegend auf Elektrolichtbogenöfen umgestellt wird. [40]

Im Projektionsbericht des Umweltbundesamtes werden zwei verschiedene Szenarien beschrieben. In dem Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) wird modelliert, wie sich die Treibhausgasemissionen entwickeln, wenn Maßnahmen, die bis zum Stichtag 31. Juli 2023 rechtlich verabschiedet und in einem Umsetzungsstadium sind, ergriffen werden. Im zweiten Szenario („Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario“, MWMS) werden weitere von der Bundesregierung geplante Klimaschutzinstrumente berücksichtigt.

Im Folgenden wird auf die Entwicklung der Stahlproduktion und des Endenergiebedarfs in Deutschland eingegangen.

6.1 Entwicklung Stahlproduktion

Im Szenario Entwicklungspfad A „Wenig Kooperation“ von Prognos/Wuppertal Institut wird ein Rückgang der Stahlproduktion um 13 % bis 2050 prognostiziert (vgl. Abbildung 10). Die begrenzte Verfügbarkeit von inländisch produziertem Wasserstoff wirkt dabei als zentraler limitierender Faktor. Zusätzlich führt eine erhöhte Materialeffizienz zu einer Nachfragereduktion von etwa 10 %. Eine grundlegende Umstellung der Produktionsrouten erfolgt ab etwa 2030, wobei sich die Dominanz der konventionellen Hochofenroute zunächst weiterhin hält. Im Entwicklungspfad B „Viel Kooperation“ wird der Produktionsrückgang auf lediglich 3 % bis 2050 geschätzt. Eine frühzeitige Veränderung der Produktionsrouten ist zentral für dieses Szenario: Bereits ab 2025 erfolgt eine deutliche Umstellung, bei der bis 2030 die alternativen Produktionsrouten H₂-DRI+SAF+BOF 16 % sowie H₂DRI+EAF 15 % der Produktion ausmachen. Die Produktion über die Hochofenroute sinkt auf einen Anteil von 44 %. [4]

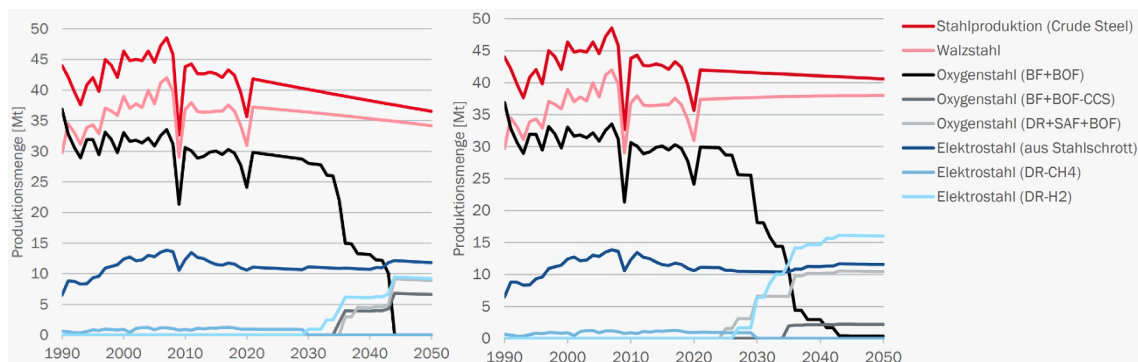


Abbildung 10: Prognose Wuppertaler Institut/Prognos (Links Pfad A, Rechts Pfad B)

Das Szenario von SCI4Climate geht bis 2045 von einer weitgehend konstanten, rückläufigen Rohstahlproduktion (insgesamt -7 %) aus. Die Stahlindustrie setzt auf die klimaneutrale Direktreduktionsroute, um mit staatlicher Unterstützung bis 2030 wesentliche Emissionsminderungen zu erreichen. Es wird davon ausgegangen, dass ab 2025 keine Neuzustellungen mehr erfolgen und die Stahlproduktion überwiegend auf die EAF-Route umstellt. Bereits ab 2030 soll ein Anteil von 27 % über die Direktreduktionsroute produziert werden und noch vor 2035 der letzte Hochofen seinen Betrieb einstellen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass alle Standorte die H₂DRI-EAF-Route verfolgen, außer der Standort von thyssenkrupp in Duisburg. Dort wird ein LD-

Konverter anstelle eines EAFs zum Einschmelzen von Eisenschwamm verwendet werden (vgl. Abschnitt 3.3). Gleichzeitig wird die Sekundärstahlquote durch eine gesteigerte Nutzung von Schrott bis 2050 von 40 % auf 50 % erhöht werden. Nach SCI4Climate steigt die Stahlerzeugungskapazität bis 2035 auf über 80 Mio t/Jahr an und sinkt anschließend auf eine Kapazität von 65 Mio t/Jahr (vgl. Abbildung 11). [40]

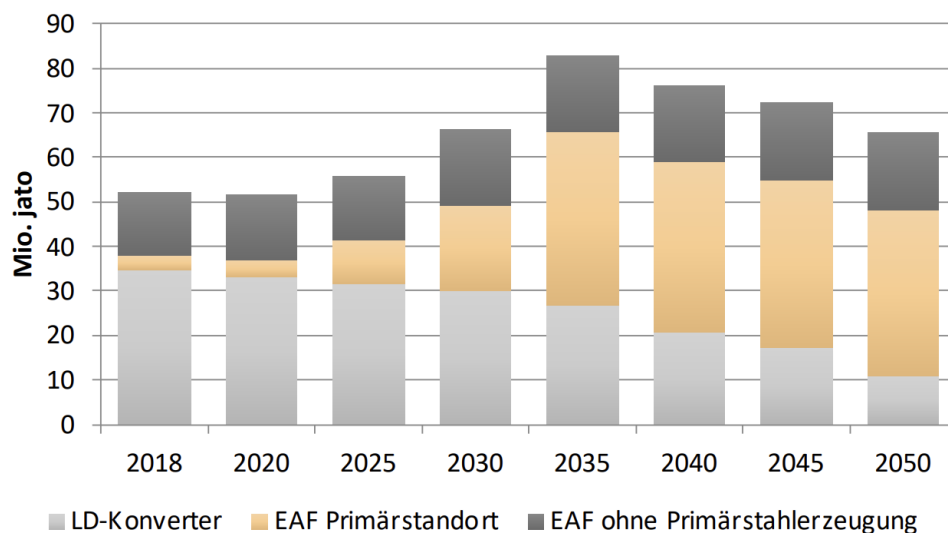


Abbildung 11: Prognose Stahlerzeugungskapazitäten SCI4Climate [40]

Im Gegensatz zu den Szenarien von prognos und SCI4Climate wird im Projektionsbericht des Umweltbundesamtes davon ausgegangen, dass die Produktionsmenge von Stahl ab dem Jahr 2020 kontinuierlich steigen wird. Im Jahr 2035 wird angenommen, dass die Produktion auf circa 43 Mio. t und im Jahr 2050 auf circa 48 Mio. t steigen wird. Die konventionelle Primärstahlproduktion sinkt gegenüber 2018 um 48 Mio. t auf 15,5 Mio. t. Ab 2045 wird nicht mehr über die konventionelle Primärstahlroute produziert. Die Treibhausgasneutralität wird hierbei mit zwei Strategien verfolgt: Ausbau der Sekundärroute und der Austausch der konventionellen Route durch die wasserstoffbasierte Direktreduktion. Der Einsatz von Erdgas wird lediglich als Brückentechnologie angesehen und andere Konkurrenztechniken werden nicht berücksichtigt. [91]

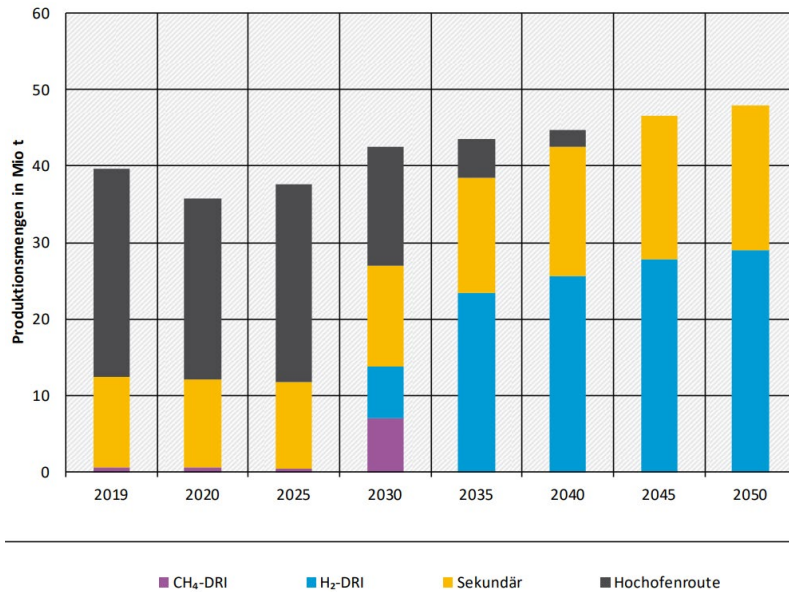


Abbildung 12: Prognose Produktionsmengen Projektionsbericht [91]

6.2 Entwicklung Endenergiebedarf in Deutschland

Die Untersuchung von Prognos/Wuppertaler Institut prognostizieren bis 2045 einen deutlichen Rückgang des Endenergiebedarfs in der Stahlindustrie von rund 45 %. Dieser Rückgang wird vor allem durch eine höhere Energieeffizienz der alternativen Routen (Hochofen: 12,0 - 16,0 GJ Brennstoff/t Rohstahl, DRI: 10,37 - 14,45 GJ Brennstoff/t Rohstahl) sowie eine sinkende Stahlproduktion begründet. In Pfad A wird circa ein Drittel des Endenergiebedarfs durch Wasserstoff gedeckt, wobei ein signifikanter Anstieg des Wasserstoffeinsatzes ab 2035 erfolgt. In Pfad B deckt Wasserstoff rund die Hälfte des Endenergieverbrauchs, mit einem früheren Anstieg ab 2030.

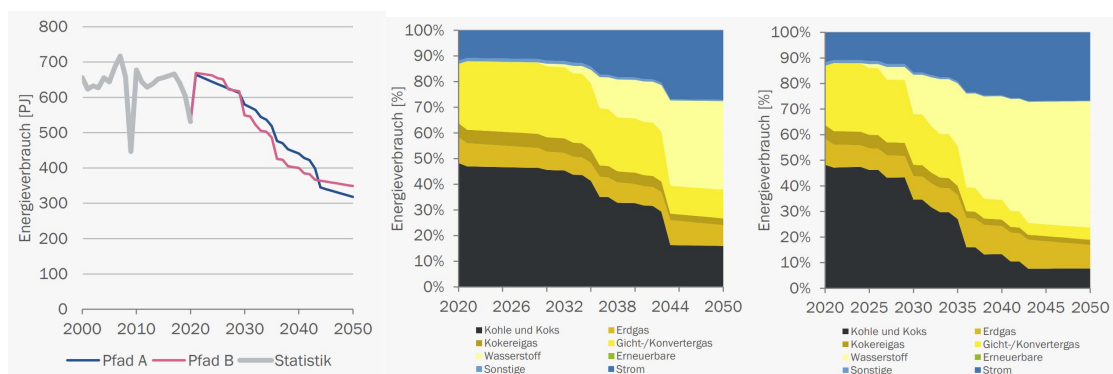


Abbildung 13: Prognose Endenergiebedarf Prognos

Das Szenario von SCI4Climate sagt kurzfristig einen höheren Einsatz von Erdgas voraus. Dies liegt zum einen daran, dass die Direktreduktion während der Einführungsphase mit Erdgas betrieben wird. Zudem ersetzt Erdgas vorübergehend die Kuppelgase aus Hochofen, Konverter und Kokereien, die aufgrund des Ausstiegs aus der konventionellen Hochofenroute wegfallen. Diese Gase werden bisher insbesondere in Wiedererwärmungsöfen verwendet. Langfristig wird der Erdgaseinsatz schrittweise

reduziert und bis 2040 vollständig durch Wasserstoff und Biomasse ersetzt. Biomasse wird dabei sowohl als Kohlenstofflieferant als auch ab 2040 als Energieträger eingesetzt. Ab 2045 wird Biomasse ausschließlich in Kombination mit CO₂-Abscheidung und -speicherung genutzt. Trotz der Transformation verbleiben geringe Mengen an Kuppelgasen, die aus Einschmelzaggregaten resultieren.

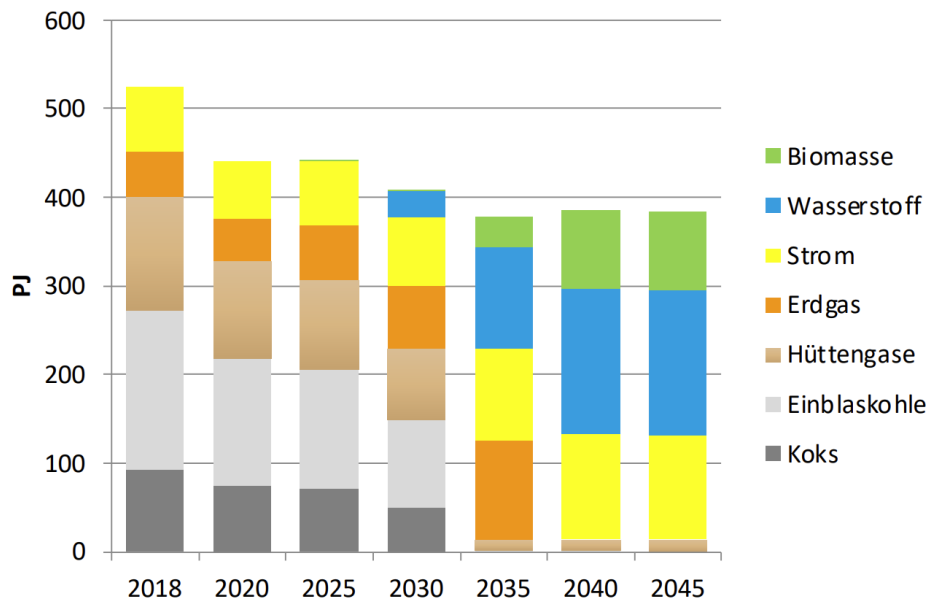


Abbildung 14: Prognose SCI4Climate

Die Beobachtung des steigenden Erdgasbedarfs deckt sich ebenfalls mit einer ausführlichen Untersuchung in der Dissertation von Kreth. Hier wird das Projekt SALCOS genauer untersucht. Es wird ein steigender Erdgasbedarf um das Fünffache bei Austausch von zwei Hochöfen + zwei Konvertern gegen zwei DRI-Schachtöfen und zwei EAFs berechnet aufgrund des Wegfalls der Kuppelgase (S. 156). Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Anlage zunächst nur von einer 100 MW Elektrolyse mit Wasserstoff versorgt wird. [13].

Im Projektionsbericht des Umweltbundesamtes wird der Endenergiebedarf der Stahlindustrie nicht nach Energieträgern unterschieden. Allerdings wird im Datenanhang der Wasserstoffbedarf der Stahlindustrie für die Direktreduktion mittels Wasserstoff prognostiziert. Wie in Abbildung 15 dargestellt, steigt der Bedarf ab dem Jahr 2027 auf 2050 stark an. Im Jahr 2050 wird ein Wasserstoffbedarf von insgesamt 280,8 PJ prognostiziert.

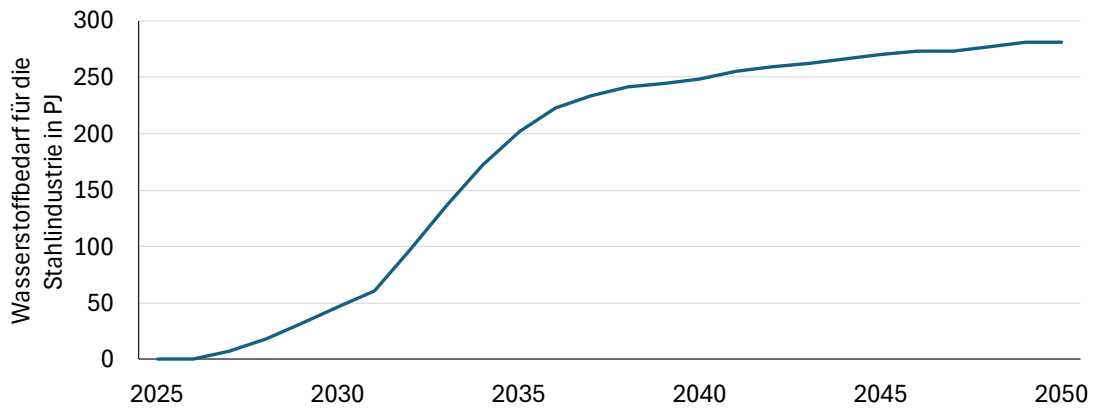


Abbildung 15: Prognostizierter Wasserstoffbedarf der Stahlindustrie nach dem Projektionsbericht des UBA [92]

In der Dissertation von Kreth („Energiewirtschaftliche Systemintegration eines CO₂-armen Hüttenwerks unter aktiver Anwendung der Sektorenkopplung“) wird die Entwicklung des Primärenergiebedarfs bei der Transformation des Hüttenwerks von Salzgitter im Rahmen des SALCOS Projektes betrachtet. Es wird die schrittweise Transformation von einem konventionellen integrierten Hüttenwerk hin zu einer H₂DRI-EAF-Route betrachtet. Die einzelnen Ausbaustufen sehen wie folgt aus:

1. Ausbaustufe:
 - a. Bau einer 100 MW-Elektrolyse, einer DRI-Anlage und eines EAFs
 - b. Stilllegung eines Hochofens und eines Konverters
2. Ausbaustufe:
 - a. Erweiterung auf 500 MW-Elektrolyse, Zubau einer zweiten DRI-Anlage und eines zweiten EAFs
 - b. Stilllegung zweiter Hochofen, zweiter Konverter und einer Kokerei
3. Ausbaustufe:
 - a. Zubau dritter EAF
 - b. Stilllegung dritter Hochofen, dritter Konverter und zweiter Kokerei [13]

Aus der Transformation des Anlagenparks ergibt sich eine Veränderung in der Zusammensetzung des Primärenergiebedarfs pro Tonne Rohstahl (vgl. Abbildung 16). Mit Zubau des DRI-Schachtofens und des EAFs ergibt sich ein sinkender Bedarf an Kohle. Der Bedarf an Erdgas steigt zunächst deutlich an, da angenommen wird, dass die Wasserstoffversorgung erst ab der dritten Ausbaustufe per Pipeline möglich ist. Weiterhin wird deutlich, dass der Primärenergiebedarf durch die Transformation insgesamt von 5,28 MWh/t_{Rohstahl} auf 2,72 MWh/t_{Rohstahl} sinkt. Wird die Elektrolyse des Wasserstoffs mit einbezogen (Annahme hier: 60 % Wirkungsgrad) bedeutet dies eine Senkung von 23 %.

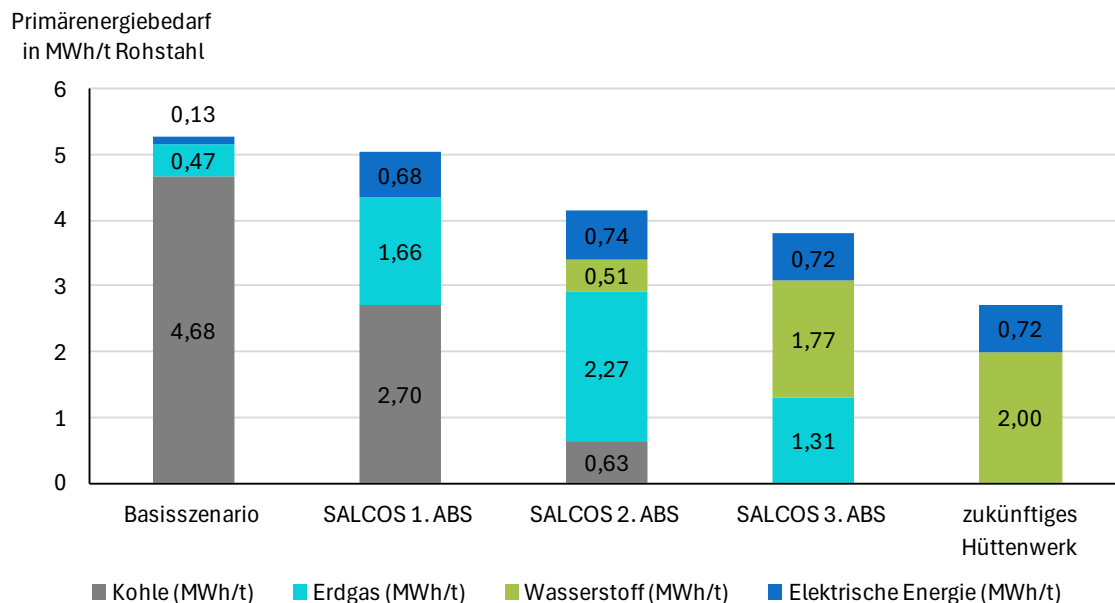


Abbildung 16: Entwicklung des Primärenergiebedarfs des Hüttenwerks [13]

6.3 Weitere erwartete Effekte

Der Aufbau wasserstoffbasierter Direktreduktionsanlagen in Deutschland führt zu einem tiefgreifenden Wandel in der Primärstahlproduktion. Neben der Dekarbonisierung der Prozesskette sind weitreichende Auswirkungen auf Energieinfrastruktur, industrielle Stoffströme, Beschäftigung und internationale Handelsstrukturen möglich.

6.3.1 Flexibilisierung

Der Einsatz von H₂-Schachtöfen ermöglicht eine potenzielle Flexibilisierung der Energieversorgungen und der Produktion. Die geplanten Schachtöfen können prinzipiell mit Erdgas und Wasserstoff in variablen Mischungsverhältnissen betrieben werden. Diese Brennstoffflexibilität eröffnet Handlungsspielräume im Energiemix, insbesondere in der Transformationsphase bei unvollständig ausgebauter Wasserstoffinfrastruktur und begrenzter Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff. Dadurch kann kurz- bis mittelfristig Versorgungssicherheit erhöht werden, während zugleich eine sukzessive Substitution fossiler Energieträger möglich bleibt.

Eine zusätzliche Flexibilitätsoption ergibt sich aus der Lager- und Transportfähigkeit des DRI. Wird DRI nach der Reduktion gekühlt und zu HBI verpresst, kann es gelagert und transportiert werden, ohne erneut zu oxidieren. Dies ermöglicht eine zeitliche und räumliche Entkopplung des Reduktionsprozesses vom Schmelzprozess. Damit kann die DRI-Erzeugung stärker an die Verfügbarkeit von Wasserstoff und die Preisstruktur des Energiesystems angepasst werden, während der Schmelzbetrieb fortgeführt wird. Im Vergleich zur Speicherung von Wasserstoff ist die Zwischenlagerung von HBI mit

geringeren Anforderungen an Infrastruktur, Sicherheitskonzepte und Verlustmanagement verbunden. [13]

Der EAF als Chargenbetrieb ermöglicht eine weitere Flexibilisierung: Der Anteil von DRI und Stahlschrott kann chargenweise variiert werden, was eine dynamische Anpassung an Rohstoffverfügbarkeit und Energiepreise erlaubt [93].

6.3.2 Stoffströme

Die Umstellung von der Hochofen-Konverter-Route auf die H_2 -DRI-EAF-Route führt zu Veränderungen der Stoffströme innerhalb integrierter Hüttenwerke sowie in nachgelagerten Industrien. Relevant ist der Wegfall der Hochofenschlacke als Kuppelprodukt der Roheisenerzeugung. Hochofenschlacke wird in der Zementindustrie als Zusatzstoff und Klinkersubstitut eingesetzt. Mit dem Rückbau der Hochöfen sinkt die Verfügbarkeit dieses Sekundärrohstoffs. Aktuell wird der Einsatz der Elektroofenschlacke aus der H_2 DRI-EAF-Route untersucht [94]. Diese ist zurzeit noch ungeeignet als Klinkersubstitut. Somit wird der Klinkeranteil zunehmen, um die Zementproduktion stabil zu halten. [4, 40].

Weiterhin verändern sich die primären Einsatzstoffströme. Die DRI-EAF-Route erfordert höhere Eisenerzqualitäten bzw. weitere Aufbereitungsverfahren. Der Gehalt an Gangart und unerwünschten Begleitelementen muss niedrig gehalten werden, da der EAF im Vergleich zur Hochofen-Konverter Route begrenzte metallurgische Reinigungswirkungen hinsichtlich Begleitelementen aufweist. Infolge dessen steigen die Anforderungen an die Zusammensetzung der Erze. [95]

Die Verfügbarkeit von geeigneten Eisenerzen für die Direktreduktion stellt eine zentrale Herausforderung für die weltweite Skalierung der DRI-Technik dar. DR-Grade-Erze machen nur 4 % des weltweiten Marktes aus [95]. Weiterhin sinkt die Qualität des Eisenerzes seit Jahren, da die Lagerstätten zunehmend abgebaut wurden und aufgrund der steigenden Nachfrage der Abbau erweitert wurde. Diese höheren Anforderungen steigern die Importabhängigkeit Deutschlands, denn die Anzahl der Lieferanten, die diese Erzqualitäten liefern, ist begrenzt. Weiterhin ist die absolute Menge, an geeigneten Eisenerzen stark eingeschränkt. [96]

Um die knappe Verfügbarkeit geeigneter Erze auszugleichen, werden in der Literatur mehrere Ansätze diskutiert. Eine Option ist eine stärkere Ausrichtung der Förderung von Hämatit auf Magnetit. Magnetiterze weisen häufig niedrigere Fe-Gehalte auf, lassen sich jedoch aufgrund ihrer Eigenschaften in der Regel effizienter aufbereiten, sodass eine Anhebung auf die für den Schachtofen erforderliche Qualität erreichbar ist. Eine weitere Option besteht in der Weiterentwicklung und Skalierung der Aufbereitungstechnik für Hämatiterze, um deren Qualität auf DR-Grade zu heben. [95]

Im Vergleich dazu ist die Prozessroute mit einem SAF im Vorteil. Im SAF können Begleitelemente und Gangart entfernt werden, sodass Erze mit niedriger Qualität eingesetzt werden können und Beschaffungsrisiken reduziert werden.

6.3.3 Beschäftigung

Die Umstellung von der Hochofen-Konverter-Route auf die DRI-Schachtofen- und EAF-basierte Prozesskette wirkt sich auch auf die Beschäftigungsstruktur in integrierten Hüttenwerken aus. Für das Projekt DRIBE2 wird angenommen, dass die Transformation an den Standorten Bremen und Eisenhüttenstadt zunächst mit einem leichten Anstieg der Beschäftigtenzahl einhergeht. Demnach steigt die Zahl der Beschäftigten in Bremen im Zeitraum der Umrüstung von 3.600 (2021) auf etwa 3800. Nach Abschluss der wesentlichen Umrüstungsmaßnahmen und nach Erreichen des Regelbetriebs in den 2030er Jahren wird ein Rückgang auf circa 3340 Beschäftigte prognostiziert. [55]

Dieser Rückgang wird unter anderem damit begründet, dass die DRI-EAF-Route eine gegenüber der klassischen Hochofenroute vereinfachte Prozesskette aufweist. Insbesondere entfallen zentrale Anlagenbereiche wie Kokerei und Sinteranlage. Je nach Standort können ebenfalls die Pelletieranlagen entfallen. [4]

6.3.4 Auslagerung ins Ausland

Im Zuge der Transformation ist, wie bereits beschrieben, eine räumliche und zeitliche Entkopplung der Prozesskette möglich. Insbesondere ist die Trennung des Reduktionsschrittes von dem anschließenden Einschmelzen möglich. Der erste Prozessschritt wird ins Ausland verlagert und anstelle von Eisenerz wird vorreduziertes Material in Form von HBI importiert und anschließend im Inland im EAF eingeschmolzen. Ein solches Modell ist insbesondere attraktiv, wenn an ausländischen Standorten günstigere Bedingungen für die DRI-Erzeugung vorliegen, beispielsweise durch bessere Verfügbarkeit von geeigneten Erzen, Wasserstoff und günstigem Strom [97]. Für Deutschland sind insbesondere heutige Lieferländer von Eisenerz wie Brasilien, Kanada und Südafrika als potentielle Konkurrenzstandorte relevant, da dort bereits die Rohstoffbasis und logistische Voraussetzungen bestehen, um perspektivisch auch HBI als Zwischenprodukt bereitzustellen. Eine solche Auslagerung würde die inländische Wertschöpfung und Beschäftigung im vorgelagerten Prozessschritt reduzieren. [4, 98, 99]

6.3.5 Aufbau Wasserstoff Versorgungsinfrastruktur

Die Einführung von Wasserstoff in der Stahlindustrie besitzt das Potential, einen synergiestiftenden Aufbau einer Wasserstoff-Versorgungsinfrastruktur zu schaffen. Diese Versorgungsinfrastruktur beinhaltet den Ausbau der Kapazitäten für erneuerbare Energien, die Entwicklung dedizierter Wasserstofftransportnetze zu den Stahlproduktionsstätten sowie die Erweiterung der Produktionskapazitäten für grünen

Wasserstoff. Sowohl bestehende als auch neue Stahlproduktionsstätten können folglich als Hubs fungieren, die eine breitere Nutzung von Wasserstoff in den anderen Sektoren ermöglichen, gestützt durch bestehende Gastransport- und Verteilungssysteme. [100]

Die Größenordnung des Infrastrukturbedarfs wird am Produktionsmaßstab deutlich: Für 1,0 Mio. t Stahl wird eine Elektrolyseurleistung von circa 600 MW nötig [101]. Damit wirkt die Stahlindustrie als Treiber für den Hochlauf großskaliger Elektrolyseprojekte und Transportinfrastruktur.

7 Funktionalität des Innovationssystem der Technik in Deutschland

Das Innovationssystem der H₂DRI-EAF-Technik in Deutschland wird maßgeblich durch das Zusammenspiel von primärstahlerzeugenden Unternehmen, Technik- und Anlagenlieferanten sowie Wissenschaft und Forschung geprägt. Eine vierte Komponente bildet die Politik auf EU-, Bundes- und Landesebene, die über Regulatorik, Zielvorhaben und Förderinstrumente die Entwicklung wesentlich beeinflusst.

Im europäischen Kontext weist die Rohstahlproduktion eine hohe räumliche Konzentration auf. Deutschland stellt 2023 den größten Anteil der EU-Rohstahlproduktion (28,1 %) gefolgt von Italien (16,7 %) [102]. Ebenso ist Deutschland bei der Wasserstoffproduktion von zentraler Bedeutung: 17,6 % des Wasserstoffs werden in Deutschland hergestellt und 14,6 % in der Niederlanden [103]. Diese industrielle Konzentration ist für das Innovationssystem relevant, da sie Skaleneffekte bei Demonstrationsprojekten, Zulieferketten und Infrastruktur begünstigt und zugleich die politische Priorisierung beeinflussen kann.

Die primärstahlerzeugenden Unternehmen in Deutschland sind ArcelorMittal, SHS-Gruppe (Dillinger, Saarstahl), Salzgitter, Thyssenkrupp Steel und HKM.

Davon haben ArcelorMittal, die SHS-Gruppe, Salzgitter und Thyssenkrupp Steel bereits laufende Projekte zum Aufbau von Direktreduktionsanlagen, wie in Tabelle 3 zusammengefasst. Tiefergehende Informationen zu den Projekten wurden in Kapitel 4.1 bereits aufgeführt.

Tabelle 3: Zusammenfassung der H₂-DRI-Projekte in Deutschland

Ausführende Stelle	Projektname	Kapazität DRI [Mio t/a]	Projektstart	Quelle
Thyssenkrupp	tkH2 Green Steel	2,5	2022	[67, 68]
Salzgitter	μDRAL (Teilprojekt aus Salcos)	2	2022	[62–64]
Arcelormittal ⁴	Dribe ²	2,4	2023	[55, 56]
SHS-Gruppe	Power4Steel	2	2023	[70]

Die HKM plant eine Dekarbonisierung mittels Direktreduktionsanlage. Ab 2025 soll die erste Anlage aufgebaut werden und bis 2045 soll die Dekarbonisierung erfolgt sein. Hierbei sollen schrittweise die Hochöfen gegen Direktreduktionsanlagen ausgetauscht

⁴ ArcelorMittal hat das Projekt im Juni 2025 gestoppt.

werden und Erdgas als Übergangstechnologie und anschließend grüner Wasserstoff genutzt werden. Konkrete Pläne wurden bisher nicht veröffentlicht [104].

Wichtigste Anlagenbauunternehmen

Die relevantesten Anlagenbauunternehmen sind Midrex und Energiron. Auf diese wurde bereits in Kapitel 3.1 eingegangen.

Wissenschaft und angewandte Forschung

Die Technologieentwicklung wird durch eine breite Forschungslandschaft getragen. Die enge Vernetzung von Forschung und Industrie trägt dazu bei, dass Innovationen schnell im Markt umgesetzt werden. Laut Analyse von Wyman sind in Deutschland über 60 universitäre und außeruniversitäre Forschungsinstitute im Stahlbereich, die Spitzenforschung auf Weltniveau betreiben [6]. Einige relevante Akteure sind:

- VDEh Betriebsforschungsinstitut
- IEHK RWTH Aachen
- Institut für Metallurgie TU Clausthal
- Institut für Eisen- und Stahltechnologie TU Freiberg
- Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH
- Institut für Technologien der Metalle Universität Duisburg-Essen

Relevante (Forschungs-)Förderungspolitik

Die Transformation zur H₂-DRI-Route ist stark durch die Förderpolitik geprägt, da es sich um Großprojekte handelt, die hohe Investitionskosten und Umsetzungsrisiken aufweisen. Zugleich ist die Stahlindustrie in einem starken internationalen Wettbewerb.

Auf EU-Ebene werden H₂-DRI-Transformationsprojekte häufig als IPCEI-Projekte eingestuft (Important Projects of Common European Interest). Diese Projekte sollen strategische Industrien stärken und Europa technologisch unabhängiger machen. Auch Teile der Großprojekte in Deutschland wurden als IPCEI eingestuft (vgl. Kapitel 4.1). Weiterhin sind die Leitlinien für staatliche Klima-, Umweltschutz- und Energiebeihilfen (KUEBLL) bedeutsam. Diese definieren den Rahmen, unter dem Mitgliedsstaaten Beihilfen zur Transformation energieintensiver Industrien gewährleisten können. Die Stahlindustrie wird als solche eingeordnet, da sie aufgrund der hohen Energieintensität und starkem internationalen Wettbewerb ein erhöhtes Risiko der Produktionsverlagerung aufweist.

Weiterhin sind europäische Forschungs- und Innovationsinitiativen relevant, insbesondere die Clean Steel Partnership der ESTEP und der Research Fund for Coal and Steel (RFCS) der europäischen Kommission.

8 Identifizierte Hemmnisse und fördernde Faktoren

Die Einführung der H₂-DRI-Technik ist mit Hemmnissen verbunden, die die Geschwindigkeit der Marktdiffusion begrenzen können. Zentrale Barrieren ergeben sich aus langen Anlagenlebensdauern, hohen Anfangsinvestitionen, dem erforderlichen Infrastrukturaufbau und der starken Kostenabhängigkeit von Energie- und Einsatzstoffpreisen in einem internationalen und wettbewerbsintensiven Marktumfeld.

Anlagenlebensdauern und hohe Investitionskosten

Anlagen der Stahlindustrie haben typischerweise einen Lebenszyklus von 40 Jahren und Investitionszyklen von 25 Jahren [1]. Investitionen in die Hochofen-Konverter-Route weisen im Schnitt eine Lebensdauer von 18 Jahren auf. Anschließend wird eine Anlage neu zugestellt oder ersetzt [105]. Dies steigert die Gefahr von Lock-in-Effekten, da Unternehmen bestehende Anlagen und Infrastruktur möglichst lange auslasten, um getätigte Investitionen zu amortisieren. In Folge kann die Bereitschaft sinken, frühzeitig auf neue Techniken umzusteigen, insbesondere wenn die bestehende Prozessroute technisch optimiert und wirtschaftlich als ausreichend wettbewerbsfähig eingeschätzt wird. [1]

Der Wechsel zur H₂DRI-EAF-Route erfordert eine grundlegende Reinvestition in neue Kernaggregate. Für den Neubau eines DRI-Schachtofen werden Investitionskosten von etwa 215 €/t_{Stahl} und für den EAF von 200 €/t_{Stahl} angegeben [4]. Diese Investitionskosten übersteigen die eines Retrofits einer konventionellen Hochofenroute um mehr als das Fünffache (mit Elektrolyseur) bzw. um das Zweifache (ohne Elektrolyseur). Zukünftig wird jedoch mit einem Rückgang der Investitionskosten gerechnet [4].

Infrastruktur

Ein weiteres wesentliches Hemmnis ist der hohe Strom- und Wasserstoffbedarf der H₂DRI-EAF-Route. Die Technik erfordert sowohl eine leistungsfähige Stromanbindung (für EAF und ggf. Elektrolyse) als auch eine Wasserstoffversorgung im industriellen Maßstab [4]. Daraus ergibt sich ein infrastruktureller Engpass: Netzausbau, Wasserstofftransportnetze und gegebenenfalls Speicherkapazitäten müssen in ausreichender Dimension entstehen und zeitlich synchron zur Umstellung der Standorte entwickelt werden. [4].

Energiekosten

Die Wirtschaftlichkeit der Stahlproduktion wird in hohem Maße von Energie- und Einsatzstoffkosten bestimmt. Diese machen 60 - 80 % der Produktionskosten aus [1]. Die Produktionskosten emissionsarmer Verfahren liegen aktuell noch über denen der konventionellen Route. Bei einem CO₂-Preis von 55 € pro Tonne und einem Wasserstoffpreis von 1780 € pro Tonne (angenommener Elektrizitätspreis von 0,027 €/kWh) ist konventioneller Stahl weiterhin wirtschaftlicher [106]. Es wird jedoch erwartet, dass bei sinkenden Wasserstoffkosten und steigendem CO₂-Preis die H₂DRI-

EAF-Route konkurrenzfähig wird [106]. Weiterhin wirkt die Marktstruktur als Herausforderung: Der Stahlmarkt ist global und ist vom intensiven Wettbewerb mit geringen Margen geprägt. [1, 105]

Versorgung mit Eisenerz

Die Verfügbarkeit geeigneter Eisenerze stellt ein Risiko für die Marktdiffusion dar. Wie bereits beschrieben, werden für den Schachtofen hohe Eisengehalte und geringe Anteile an Gangart benötigt. Gleichzeitig ist seit Jahren ein Rückgang der Erzqualität zu beobachten. Die abnehmende Erzqualität erfordert verstärkte Aufbereitungsprozesse, um die für die Direktreduktion erforderlichen Spezifikationen zu erreichen. Im Vergleich dazu kann die Route über den SAF Vorteile aufweisen, da diese Erze mit geringerer Qualität verarbeiten kann. [101, 107]

9 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Zusammenfassung der Ausgangslage

Die ökonomische Bedeutung der Stahlindustrie ist hoch. Der Stahlsektor weist einen hohen Wertschöpfungsmultiplikator auf: Verringert sich die Wertschöpfung in der Stahlindustrie um 1 €, führt dies zu einem gesamtwirtschaftlichen Verlust von 2,7 € [105]. Somit ist die Stahlindustrie nicht nur ein zentraler Arbeitgeber, sondern auch ein wesentlicher Treiber für die deutsche und europäische Gesamtwirtschaft.

Gleichzeitig ist die Transformation stark von Faktoren außerhalb des Sektors abhängig. Wichtige Faktoren sind hierbei [6]:

- Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff
- Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur
- Preisentwicklung von Wasserstoff
- Regulatorische Rahmenbedingungen für CO₂-arme Stahlproduktion

Somit ist der Einfluss der Wasserstofftransformation auf den Ausbau der Direktreduktionsöfen hoch.

Der Umstieg auf die H₂DRI-EAF-Route wird zu einem starken Anstieg der Wasserstoffnachfrage führen. Laut BMW Prognose (2045) benötigt die Stahlindustrie 290 - 440 TWh an Wasserstoff. Gleichzeitig hinkt der aktuelle Ausbau von Elektrolyseanlagen stark hinter den politischen Zielen hinterher. Bis 2025 standen in Deutschland lediglich 0,185 GW [108] Elektrolysekapazität zur Verfügung, während das Ziel für 2030 bei 10 GW [109] liegt. Bereits jetzt ist absehbar, dass der Großteil des künftigen Wasserstoffbedarfs (50 - 70 %) über Importe gedeckt werden muss.

Die Produktionskosten der H₂DRI-EAF-Route liegen gegenwärtig und mittelfristig deutlich über der konventionellen Route. Der hohe Preisunterschied zwischen Erdgas und (grünem) Wasserstoff ist eine Herausforderung für die Transformation [105]. Es besteht das Risiko, dass die Industrie aus Kostengründen bei den erdgasbasierten Verfahren verbleibt, sofern keine gezielten Unterstützungsmaßnahmen etabliert werden.

FuE Aktivitäten

Deutschland nimmt aktuell eine führende Stellung in der Forschung und Entwicklung im metallverarbeitenden Gewerbe ein [6]. Vier Großprojekte wurden für den Aufbau eines Schachtofens für die H₂DRI-EAF-Route gefördert. Drei Vorhaben befinden sich aktuell in der Umsetzung, während ein Projekt bereits eingestellt wurde. Dies verdeutlicht, dass die technologische Grundlage für die großindustrielle Anwendung grundsätzlich vorhanden ist, die Überführung in den industriellen Maßstab jedoch weiterhin mit Umsetzungsrisiken verbunden ist.

Die aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konzentrieren sich insbesondere auf den Übergang vom erdgasbasierten zum rein wasserstoffbasierten Betrieb, auf die Anforderungen an das Einsatzmaterial sowie die Prozessführung, insbesondere die Vorwärmung des Wasserstoffs. Der Wechsel von Erdgas zu Wasserstoff verändert das Reduktionsverhalten im Schachtofen grundlegend, da sich sowohl die Reaktionskinetik als auch die Wärmebilanz des Prozesses verschieben. Daraus ergibt sich weiterer Forschungsbedarf, insbesondere hinsichtlich der Bestimmung optimaler Gaszusammensetzungen, der Auslegung der Gasführung sowie der Anpassung der Reaktorgeometrie an die Bedingungen des wasserstoffbasierten Betriebs.

Darüber hinaus erfordert die Umstellung von der Hochofenroute auf die H₂-DRI-Route eine Anpassung des eingesetzten Eisenerzmaterials. Da die Reduktion im Schachtofen im festen Zustand erfolgt, verbleiben nicht reduzierbare Gangminerale im Produkt und können im nachgeschalteten EAF zu erhöhter Schlackenbildung, Eisenverlusten und zusätzlichem Energiebedarf führen. Aus diesem Grund sind aktuell nur Eisenerze mit hoher Qualität für die H₂DRI-EAF-Route geeignet. Zugleich stellt die weltweit sinkende Verfügbarkeit hochwertiger Eisenerze eine Herausforderung dar. Es besteht demnach Forschungsbedarf in der Untersuchung, wie die H₂DRI-EAF-Route an sinkende Eisenerzqualitäten angepasst werden kann.

Politikinstrumente

Für die erfolgreiche Einführung der H₂DRI-EAF-Route ist ein langfristig verlässlicher politischer Instrumentenmix erforderlich. Von zentraler Bedeutung ist hierbei die Sicherstellung wettbewerbsfähiger Energiepreise. Dies betrifft insbesondere den Strompreis. Stromkosten sind der wichtigste Einflussfaktor für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der Direktreduktion. Weiterhin ist der Preis von grünem Wasserstoff entscheidend, um Erdgas als Übergangsenergieträger zukünftig zu ersetzen.

Eng damit verbunden ist die Notwendigkeit eines beschleunigten und synchronisierten Ausbaus der Energieinfrastruktur, insbesondere für (grünen) Wasserstoff. Der Hochlauf der H₂DRI-EAF-Route kann nur gelingen, wenn Wasserstofferzeugung, Import, Transport, Speicherung und industrielle Nutzung zeitlich und räumlich aufeinander abgestimmt sind. Dies wird von verschiedenen Stahlverbänden gefordert [1, 6, 110].

Neben der Angebotsseite ist auch die Nachfrageseite politisch zu adressieren. Da CO₂-arme Stahlproduktion gegenwärtig mit höheren Kosten verbunden ist als die konventionelle Route, bedarf es der Etablierung grüner Leitmärkte für emissionsarmen Stahl. Geeignete Instrumente umfassen produktbezogene Standards, Zertifizierungssysteme oder Quotenregelungen, die eine verlässliche Nachfrage nach CO₂-armem Stahl erzeugen.

Weiter fordern Industrievertreter*innen eine zuverlässige Finanzierung der Transformation. Neben der Förderung einzelner Pilot- und Demonstrationsprojekte sind Instrumente erforderlich, die die Skalierung und den industriellen Dauerbetrieb

absichern. Die Planungssicherheit sollte über die Anfangsinvestition hinausgehen und die laufenden Mehrkosten in der Markthochlaufphase einbeziehen. Das Einstellen des Demonstrationsvorhabens von ArcelorMittal unterstreicht diese Dringlichkeit der zuverlässigen Finanzierung der Transformation.

Der Schutz der deutschen und europäischen Stahlindustrie vor Wettbewerbsnachteilen ist von hoher Bedeutung. Da die Dekarbonisierung mit erheblichen Zusatzkosten verbunden ist, müssen politische Rahmenbedingungen so ausgestaltet werden, dass Carbon Leakage vermieden und faire internationale Wettbewerbsbedingungen gewährleistet werden. Dies erfordert eine enge Verzahnung von Klimaschutz-, Handels- und Industriepolitik.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der Methodik, angelehnt an die EDUAR&D-Methode.....	8
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Schachtofens zur Direktreduktion, eigene Darstellung nach [10, 14].....	11
Abbildung 3: Schematische Darstellung des MIDREX Flex Schachtofen [16, 21]	13
Abbildung 4: Schematische Darstellung des H ₂ -Schachtofens von MIDREX [16]	14
Abbildung 5: Standard Prozessschema Energiron [17].....	15
Abbildung 6: Vergleich der Herstellungsrouten zur Stahlerzeugung [32]	17
Abbildung 7: Transnationale Anmeldungen zur Direktreduktion von Stahl	23
Abbildung 8: Midrex Länderaufteilung mit Deutschland.....	24
Abbildung 9: Transformationskosten der DRI-EAF und DRI-SAF-BOF-Routen in Abhängigkeit von der Qualität des Einsatzmaterials nach Wimmer [37]	35
Abbildung 10: Prognose Wuppertaler Institut/Prognos (Links Pfad A, Rechts Pfad B)....	38
Abbildung 11: Prognose Stahlerzeugungskapazitäten SCI4Climate [40]	39
Abbildung 12: Prognose Produktionsmengen Projektionsbericht [91]	40
Abbildung 13: Prognose Endenergiebedarf Prognos.....	40
Abbildung 14: Prognose SCI4Climate	41
Abbildung 15: Prognostizierter Wasserstoffbedarf der Stahlindustrie nach dem Projektionsbericht des UBA [92].....	42
Abbildung 16: Entwicklung des Primärenergiebedarfs des Hüttenwerks [13]	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wichtigste Anmeldeländer für die Direktreduktion von Stahl in Schachtöfen, 2015-2022.....	23
Tabelle 2: Wichtigste Patentanmelder für Direktreduktion von Stahl in Schachtöfen, 2015-22.....	24
Tabelle 3: Zusammenfassung der H ₂ -DRI-Projekte in Deutschland	47

Anhang

A. Reaktionsmechanismen Eisenerzreduktion

Die Reaktionsreaktion von Eisenerz zu DRI durchläuft mehrere Stufen. Das Eisenerz besteht zu großen Teilen aus Hämatit (Fe_2O_3) und wird mittels H_2 reduziert. Zunächst wird Hämatit zu Magnetit (Fe_3O_4) reduziert (Formel 1). Je nach Temperatur bildet sich aus Magnetit entweder FeO ($T > 570^\circ\text{C}$, Formel 2) oder Fe ($T < 570^\circ\text{C}$, Formel 3) [10]. Das FeO wird weiter zu Fe reduziert (Formel 4).

Reaktion	Reaktionsenthalpie (J/mol)	Formel	Quelle
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-6020	1	[10]
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2 \rightarrow \text{FeO} + \text{H}_2\text{O}$	60580	2	
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$	37780	3	
$\text{FeO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$	30180	4	

Die Reaktionen von Eisenoxid mit Wasserstoff sind bis auf die Reaktion 1 endotherm. Das bedeutet, dass für den Ablauf der Reaktion zusätzliche Wärmeenergie zugeführt werden muss. Diese Energie wird benötigt, um die Bindung zwischen dem Sauerstoff und dem Eisen im Eisenoxid zu lösen und den Wasserstoff zur Reduktion des Eisenerzes zu aktivieren.

Im Gegensatz dazu ist die Reduktion mit CO exotherm und Wärmeenergie wird freigesetzt. Demnach muss bei der Verwendung von Wasserstoff zur Reduktion von Eisenerz dem Prozess zusätzlich Energie zugeführt werden, um eine konstante Reduktionstemperatur aufrechtzuerhalten. Dies kann durch Vorwärmen des Einsatzmaterials oder durch Erwärmen im Reaktor erreicht werden [8, 10].

Literatur

1. Budinis S, Levi P, Mandová H, Vass T (2020) Iron and Steel Technology Roadmap. Towards more sustainable steelmaking, Paris
2. World Steel Association (2024) 2024 World Steel in Figures, Brüssel
3. Böhm C, Friesinger W (2024) Shaping the future of direct reduction and green ironmaking. Steeltimes international direct reduced iron webinar, online
4. Piégas A, Muralter F, Kulkarni P, Limbers J, Lübbers S, Kirchner A, Samadi S (2022) Optionen für eine klimaneutrale und nachhaltige Grundstoffindustrie in Deutschland. Entwicklungspfade für ausgewählte Wirtschaftszweige
5. Somers J (2022) Technologies to decarbonise the EU steel industry. EUR, Bd 30982. Publications Office of the European Union, Luxembourg
6. Naujok N, Stamm H, Morrow P, Kempermann H, Klink H, Kestermann C, Zink B (2024) Die Stahlindustrie am Scheidepunkt. Wegbereiter für Transformation und gesamtwirtschaftliche Resilienz. Eine Studie im Auftrag der Wirtschaftsvereinigung Stahl
7. (2025) Hersteller ArcelorMittal stoppt Pläne für "grüne" Stahlproduktion. tagesschau.de
8. Shahabuddin M, Rahbari A, Sabah S, Brooks G, Pye J, Rhamdhani MA (2024) Process modelling for the production of hydrogen-based direct reduced iron in shaft furnaces using different ore grades. Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications. doi:10.1177/03019233241254666
9. Babich A, Senk D (2022) Low carbon ironmaking technologies: an European approach Iron Ore. Elsevier, S 777–816
10. Ji Y, Chi Z, Yuan S, Chen Y, Li Y, Jiang T, Liu X, Zhang W (2024) Development and Application of Hydrogen-Based Direct Reduction Iron Process. Processes 12(9):1829. doi:10.3390/pr12091829
11. Bhaskar A, Assadi M, Nikpey Somehsaraei H (2020) Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen. Energies 13(3):758. doi:10.3390/en13030758
12. Cavaliere P (Hrsg) (2019) Clean Ironmaking and Steelmaking Processes. Springer International Publishing, Cham
13. Kreth N (2023) Energiewirtschaftliche Systemintegration eines CO₂-armen Hüttenwerks unter aktiver Anwendung der Sektorenkopplung, MyCoRe Community
14. thyssenkrupp (2024) Klimaneutraler Stahl - Unsere Strategie | thyssenkrupp Steel. <https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/unternehmen/nachhaltigkeit/klimastrategie/klimastrategie.html>. Zugegriffen: 13. November 2024
15. Manenti AA (2017) The role of DRI and HBI in modern steelmaking and DRI technology trends. International Iron metallics association.

- https://www.metallics.org/assets/files/Member-Area/Dusseldorf%20_2017/Tenova.pdf
16. Midrex Technologies (2023) Ironmaking technology for a sustainable steel industry
 17. Tenova HYL, Danieli headquarters Energiron. The Innovative Direct Reduction Technology
 18. HYL/Energiron Projects Reference List.
https://www.energiron.com/sites/default/files/documents/ENERGIRON_Complete_referencelist%20%281%29%20%281%29.pdf. Zugegriffen: 18. Dezember 2024
 19. Midrex Technologies, Inc. (2024) MIDREX Plants - Midrex Technologies, Inc.
<https://www.midrex.com/about-midrex-2/midrex-plants-map/>. Zugegriffen: 02. Oktober 2024
 20. John Linklater (2021) Adapting to raw materials challenges. Part 1 - Operating midrex plants with lower grade pellets & Lump ores
 21. Midrex Technologies, Inc. (2020) Ultra-Low CO₂ Ironmaking: Transitioning to the Hydrogen Economy - Midrex Technologies, Inc. <https://www.midrex.com/tech-article/ultra-low-co2-ironmaking-transitioning-to-the-hydrogen-economy/>. Zugegriffen: 21. November 2024
 22. Tang J, Chu M, Li F, Feng C, Liu Z, Zhou Y (2020) Development and progress on hydrogen metallurgy. *Int J Miner Metall Mater* 27(6):713–723. doi:10.1007/s12613-020-2021-4
 23. Metius GE, McClelland JM, Meissner DC, Montague SC (2013) CA2915681 - System and Method for reducing iron oxide to metallic iron using natural gas CA2915681(2915681).
<https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CA154265875>
 24. Hartbrich I (2022) Stahl: Diese Anlagentechnik wird bei Thyssenkrupp und Co. den Hochofen ablösen
 25. Dorndorf M (2020) Hydrogen use in Direct Reduction (DR) Plant - potentials for CO₂ mitigation in steel works. Deliverable Report
 26. (2024) Electrical Process Gas Heater (E-PGH).
<https://www.energiron.com/electrical-process-gas-heater-e-pgh>. Zugegriffen: 19. Februar 2026
 27. IEA (2024) Innovation Gaps – Analysis - IEA.
<https://www.iea.org/reports/innovation-gaps>. Zugegriffen: 05. Dezember 2024
 28. HYBRIT (2023) Direktreduktion med vätgas i pilotskala - HYBRIT.
<https://www.hybritdevelopment.se/en-fossilfri-utveckling/direktreduktion-med-vatgas-i-pilotskala/>. Zugegriffen: 21. Oktober 2024
 29. Hartbrich L (2022) Direktreduktion: SMS soll erstes klimaneutrales Stahlwerk der Welt bauen. *Grüner Stahl. VDI Nachrichten*
 30. Langner A (2022) Hohe Energiepreise - ArcelorMittal stellt zwei Anlagen in Deutschland ab

31. Längen HB (2021) Wege zur Minderung von CO₂-Emissionen in der Eisen- und Stahlindustrie in Europa. https://vdeh.de/media/2021-03-30_luengen_wege_zur_minderung_von_co2-emissionen.pdf
32. Quicker P, Weber K (Hrsg) (2016) Biokohle. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden
33. Lösch O (2021) Umfassende Bewertung der Direktreduktionsroute für eine zukunftsfähige, klimaneutrale Stahlherstellung, Karlsruhe
34. Radloff R, Abdelshafy A, Walther G (2023) An integrative and prospective approach to regional material flow analysis: Modeling the decarbonization of the North Rhine-Westphalian steel industry. *J of Industrial Ecology* 27(3):662–675. doi:10.1111/jiec.13387
35. Yang C, Wei L, Zhu D, Pan J, Xia G, Qu S (2025) Hydrogen-based direct reduction behavior of iron ore pellets with iron grades ranging from 59 % to 68 %. *International Journal of Hydrogen Energy* 138:787–801. doi:10.1016/j.ijhydene.2025.04.006
36. Sabah S, Shahabuddin M, Rahbari A, Brooks G, Pye J, Rhamdhani MA (2024) Effect of gangue on CO₂ emission for different decarbonisation pathways. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications* 51(4):356–368. doi:10.1177/03019233241242553
37. Wimmer G, Rosner J, Fleischanderl A Two steps towards net zero carbon? *Steel times international* 2022(46):58–61
38. Abdelshafy A, Walther G (2022) Exploring the effects of energy transition on the industrial value chains and alternative resources: A case study from the German federal state of North Rhine-Westphalia (NRW). *Resources, Conservation and Recycling* 177:105992. doi:10.1016/j.resconrec.2021.105992
39. Perpiñán J, Peña B, Bailera M, Eveloy V, Kannan P, Raj A, Lisbona P, Romeo LM (2023) Integration of carbon capture technologies in blast furnace based steel making: A comprehensive and systematic review. *Fuel* 336:127074. doi:10.1016/j.fuel.2022.127074
40. Doré L, Fishedick M, Fischer A, Hanke T, Holtz G, Krüger C, Lechtenböhme S, Samadi S, Saurat M, Schneider C, Tönjes A (2023) : Treibhausgasneutralität bis 2045 – Ein Szenario aus dem Projekt SCI4climate.NRW. Wuppertal Institut & Institut der deutschen Wirtschaft
41. Lopes DV, Quina MJ, Frade JR, Kovalevsky AV (2022) Prospects and challenges of the electrochemical reduction of iron oxides in alkaline media for steel production. *Front. Mater.* 9. doi:10.3389/fmats.2022.1010156
42. Holtz G, Schüwer D, Samadi S Klimaneutrale Produktion von Stahl, Zement und Kunststoffen - Lösungswege und Herausforderungen Zement in der Geotechnik - noch zeitgemäß? Beiträge zum 13. RuhrGeo-Tag 2024
43. Lavelaine de Maubeuge H, van der Laan S, Hita A, Olsen K, Serna M, Haarberg GM, Frade J (2016) Iron production by electrochemical reduction of its oxide for high

- CO₂ mitigation (IERO). Final report. EUR, Bd 28065. Publications Office of the European Union, Luxembourg
44. (2024) Home | Siderwin. <https://www.siderwin-spire.eu/>. Zugriffen: 04. Dezember 2024
45. (2024) ArcelorMittal and John Cockerill announce plans to develop world's first industrial scale low temperature, iron electrolysis plant | ArcelorMittal. <https://corporate.arcelormittal.com/media/press-releases/arcelormittal-and-john-cockerill-announce-plans-to-develop-world-s-first-industrial-scale-low-temperature-iron-electrolysis-plant>. Zugriffen: 06. Dezember 2024
46. (2024) Results | Siderwin. <https://www.siderwin-spire.eu/content/results>. Zugriffen: 04. Dezember 2024
47. Duarte FH (2023) Valorization of an industrial iron-rich residue by electroreduction for steel production. Dissertation, Universidade de Aveiro
48. Boston Metal (2024) Green Steel Solution - Boston Metal. <https://www.bostonmetal.com/green-steel-solution/>. Zugriffen: 04. Dezember 2024
49. Dutta SK, Sah R (2016) Direct Reduced Iron: Production. In: Colás R, Totten GE (Hrsg) Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys. CRC Press, S 1082–1108
50. Lohmaier L (2022) Agglomerationstechnologien für Reststoffe aus Midrex-Direktreduktionsanlagen. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg
51. Han H, Duan D, Yuan P, Li D (2015) Biomass reducing agent utilisation in rotary hearth furnace process for DRI production. Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications 42(8):579–584. doi:10.1179/1743281215y.0000000001
52. Nassaralla CL (2001) Iron Production Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Elsevier, S 4296–4301
53. Cavaliere P (2019) Direct Reduced Iron: Most Efficient Technologies for Greenhouse Emissions Abatement. In: Cavaliere P (Hrsg) Clean Ironmaking and Steelmaking Processes. Springer International Publishing, Cham, S 419–484
54. Hegemann K-R, Guder R (2019) Reduktion und Direktreduktion der Eisenerze Quellen für Emissionen. In: Hegemann K-R, Guder R (Hrsg) Roheisenerzeugung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, S 15–19
55. Die Senatorin für Wirtschaft, Häfen und Transformation, Der Senator für Finanzen (2024) Vorlage für die Sitzung des Senats am 19.03.2024. „Bremer Wasserstoff IPCEI/KUEBILL Projekt DRIBE2“. - Landeskofinanzierung, Änderungsvereinbarung zur Verwaltungsvereinbarung -
56. (2023) EnArgus Vorhaben '03H2I014' aus Suche nach 'dribe'. <https://www.enargus.de/detail/?id=199030091>. Zugriffen: 24. Oktober 2024
57. Hyperlink (2024) Hyperlink. <https://www.hyperlink-gasunie.de/>. Zugriffen: 29. Oktober 2024

58. Stock R (2024) Clean Hydrogen Coastline - wasserstoff-niedersachsen.de.
<https://www.wasserstoff-niedersachsen.de/clean-hydrogen-coastline/>. Zugegriffen: 29. Oktober 2024
59. (2025) "Grüner" Stahl: ArcelorMittal stoppt Pläne - Kritik von IG Metall. ZDFheute
60. Salzgitter AG (2024) Meilenstein bei SALCOS® erreicht - Salzgitter AG vergibt Auftrag für Direktreduktionsanlage. <https://www.salzgitter-ag.com/de/newsroom/pressemeldungen/details/meilenstein-bei-salcos-erreicht-salzgitter-ag-vergibt-auftrag-fuer-direktreduktionsanlage-20791.html>. Zugegriffen: 30. Oktober 2024
61. Salzgitter AG (2024) EU-Kommission erklärt staatliche Förderung für CO2-arme Stahlproduktion der Salzgitter AG für zulässig. <https://www.salzgitter-ag.com/de/newsroom/pressemeldungen/details/eu-kommission-erklaert-staatliche-foerderung-fuer-co2-arme-stahlproduktion-der-salzgitter-ag-fuer-zulaessig-20163.html>. Zugegriffen: 30. Oktober 2024
62. SALCOS® (2024) µDRAL. <https://salcos.salzgitter-ag.com/de/mydral.html>. Zugegriffen: 24. Oktober 2024
63. (2024) ENERGIRON® towards a green future – ENERGIRON®.
<https://www.energiron.com/energiron-towards-a-green-future/>. Zugegriffen: 24. Oktober 2024
64. (2024) New direct reduction plant (DRP) for Salzgitter AG – ENERGIRON®.
<https://www.energiron.com/new-direct-reduction-plant-drp-for-salzgitter-ag/>. Zugegriffen: 24. Oktober 2024
65. (2023) EnArgus Vorhaben '03H2I031' aus Suche nach 'salcos'.
<https://www.enargus.de/detail/?id=28431703>. Zugegriffen: 24. Oktober 2024
66. (2023) EnArgus Vorhaben '03H2I047' aus Suche nach 'tkh2'.
<https://www.enargus.de/detail/?id=22892855>. Zugegriffen: 24. Oktober 2024
67. Midrex Technologies, Inc. (2023) thyssenkrupp Steel Selects MIDREX Flex™ for Immediate CO2 Emissions Reduction - Midrex Technologies, Inc.
<https://www.midrex.com/press-release/thyssenkrupp-steel-selects-midrex-flex-for-immediate-co2-emissions-reduction/>. Zugegriffen: 24. Oktober 2024
68. (2022) Landesregierung beschließt Unterstützung für klimaneutrale Stahlerzeugung im Ruhrgebiet | Land.NRW.
<https://www.land.nrw/pressemitteilung/landesregierung-beschliesst-unterstuetzung-fuer-klimaneutrale-stahlerzeugung-im>. Zugegriffen: 24. Oktober 2024
69. Wirtschaft und Klimaschutz, BMWK - Bundesministerium für (2024) Weg frei für die Stahl-Transformation: Europäische Kommission genehmigt Förderung der grünen Stahlerzeugung im Saarland. BMWI.
<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/12/20231219-weg-frei-fur-die-stahl-transformation.html>. Zugegriffen: 30. Oktober 2024
70. Reinicke M, Wernet J (2024) Nächster Schritt zur Transformation: Zentrale Anlagen für größtes europäisches Dekarbonisierungsprojekt Power4Steel bestellt.

- <https://www.stahl-holding-saar.de/shs/de/presse/pressemitteilungen/naechster-schritt-zur-transformation-zentrale-anlagen-fuer-groesstes-europaeisches-dekarbonisierungsprojekt-power4steel-bestellt-114148.shtml>. Zugriffen: 30. Oktober 2024
71. <https://www.energiesystem-forschung.de/> (2024) Projekt H2Stahl.
<https://www.energiesystem-forschung.de/forschen/projekte/reallabor-der-energiegewende-h2-stahl>. Zugriffen: 31. Oktober 2024
72. (2023) EnArgus Vorhaben '03EWR014A' aus Suche nach 'Reallabor H2Stahl'.
<https://www.enargus.de/detail/?id=6738349>. Zugriffen: 31. Oktober 2024
73. (2023) EnArgus Vorhaben '03EWR014B' aus Suche nach 'H2Stahl'.
<https://www.enargus.de/detail/?id=6738394>. Zugriffen: 04. November 2024
74. (2023) EnArgus Vorhaben '03EWR014C' aus Suche nach 'H2Stahl'.
<https://www.enargus.de/detail/?id=6738442>. Zugriffen: 04. November 2024
75. (2024) Reallabor der Energiewende H2Stahl startet in Duisburg – Bund fördert Wasserstoffnutzung mit 37 Millionen Euro, Landesregierung unterstützt Teilprojekt mit 5,3 Millionen Euro | Land.NRW.
<https://www.land.nrw/pressemitteilung/reallabor-der-energiegewende-h2stahl-startet-duisburg-bund-foerdert>. Zugriffen: 31. Oktober 2024
76. (2024) Klimaneutrale Zukunft der Stahlproduktion: Reallabor der Energiewende H2Stahl startet am Standort Duisburg von Thyssenkrupp Steel | Air Liquide.
<https://de.airliquide.com/ueber-uns/medien/news/klimaneutrale-zukunft-der-stahlproduktion-reallabor-der-energiegewende-h2stahl-startet-am-standort-duisburg-von-thyssenkrupp-steel>. Zugriffen: 31. Oktober 2024
77. Schütte J, Graas A (2025) Verbundvorhaben Reallabor: H2Stahl – Wasserstofftechnologien zur schrittweisen Dekarbonisierung der Stahlindustrie; Teilvorhaben: Dynamische H2-Versorgung und Netzentwicklung. Schlussbericht, Hannover
78. (2024) Einschmelz-Anlage thyssenkrupp - Energieforschung.NRW.
https://www.energieforschung.nrw/neuigkeiten/einschmelzanlage_thyssenkrupp. Zugriffen: 31. Oktober 2024
79. (2024) Land fördert innovativen Einschmelzer für die klimaneutrale Stahlherstellung im Ruhrgebiet mit 6,2 Millionen Euro. <https://www.wirtschaft.nrw/land-foerdert-innovativen-einschmelzer-fuer-die-klimaneutrale-stahlherstellung-im-ruhrgebiet-mit-62>. Zugriffen: 31. Oktober 2024
80. (2024) EnArgus Vorhaben '03EN2069A' aus Suche nach 'optilbo'.
<https://www.enargus.de/detail/?id=5712483>. Zugriffen: 09. Dezember 2024
81. (2024) EnArgus Vorhaben '03EN2077D' aus Suche nach 'DisTherPro'.
<https://www.enargus.de/detail/?id=10311942>. Zugriffen: 09. Dezember 2024
82. Birat J-P (2023) Net-Zero transition in the steel sector: beyond the simple emphasis on hydrogen, did we miss anything? *Matériaux & Techniques* 111(2):201. doi:10.1051/mattech/2023003

83. Zakeri A, Coley KS, Tafaghodi L (2023) Hydrogen-Based Direct Reduction of Iron Oxides: A Review on the Influence of Impurities. *Sustainability* 15(17):13047. doi:10.3390/su151713047
84. Li S, Gu H, Huang A, Zou Y, Yang S, Fu L (2022) Thermodynamic analysis and experimental verification of the direct reduction of iron ores with hydrogen at elevated temperature. *J Mater Sci* 57(43):20419–20434. doi:10.1007/s10853-022-07855-9
85. Wang RR, Zhao YQ, Babich A, Senk D, Fan XY (2021) Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production* 329:129797. doi:10.1016/j.jclepro.2021.129797
86. Ramakgala C, Danha G (2019) A review of ironmaking by direct reduction processes: Quality requirements and sustainability. *Procedia Manufacturing* 35:242–245. doi:10.1016/j.promfg.2019.05.034
87. Shao L, Zou Z, Saxén H (2024) Performance improvement of the H₂ shaft furnace: A numerical study on hot-charge operation. *Fuel* 378:132878. doi:10.1016/j.fuel.2024.132878
88. Zare Ghadi A, Radfar N, Valipour MS, Sohn HY (2023) A Review on the Modeling of Direct Reduction of Iron Oxides in Gas-Based Shaft Furnaces. *steel research int.* 94(6). doi:10.1002/srin.202200742
89. (2026) Electric process gas heater for preheating of hydrogen and natural gas mixtures in DRI or BF plants | INCITE. <https://innovation-centre-for-industrial-transformation.ec.europa.eu/innovative-techniques/electric-process-gas-heater-preheating-hydrogen-and-natural-gas-mixtures-dri>. Zugegriffen: 09. März 2026
90. (2024) Prothal® TH: MW-sized Electric Process Gas Heater Charting the Course to Sustainable Industry
91. Harthan RO, Förster H, Borkowski K et al (2024) Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024)
92. Harthan RO, Förster H, Borkowski K et al (2024) Datenanhang mit Kernindikatoren zum Projektionsbericht 2024. Kernindikatoren der Projektionen 2024 (Datentabelle)
93. Devlin A, Kossen J, Goldie-Jones H, Yang A (2023) Global green hydrogen-based steel opportunities surrounding high quality renewable energy and iron ore deposits. *Nat Commun* 14(1):2578. doi:10.1038/s41467-023-38123-2
94. Schneider J, Adam C, Adamczyk B, Algermissen D, Ebert D, Ehrenberg A, Gerlach J, Mayer F, Schraut K (2026) Usage of BOF Slag and Next Generation EAF Slag in the Cement Industry. *J. Sustain. Metall.* doi:10.1007/s40831-026-01481-4
95. Nicholas S, Basirat S (2022) Iron Ore Quality o Potential Headwind to Green Steelmaking. Technology and Mining Option are available to hit net zero steel targets
96. Doyle A, Voet T (2021) The DRI dilemma: Could raw material shortages hinder the steel industry's green transition? McKinsey & Company
97. Hoffmann C, Eloot K, Gurlit W, Horend C, Klijer S, Heimer M (2026) Green-steel hubs: A pathway to decarbonize the steel industry | McKinsey.

- <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/green-steel-hubs-a-pathway-to-decarbonize-the-steel-industry>. Zugriffen: 08. April 2026
98. (2022) Safeguarding green steel in Europe: Facing the natural-gas challenge. McKinsey & Company
99. Baroyan A, Kravchenko O, Prates C, Vercammen S, Zeumer B (2023) The resilience of steel: Navigating the crossroads. McKinsey & Company
100. Albrecht U, Ball M, Bünger U, Kutz C, Michalski J (2022) Emissionsfreie Stahlerzeugung. Metastudie zu den technischen, technologischen und wirtschaftlichen Parametern für die Umstellung der deutschen Stahlindustrie auf eine emissionsarme Stahlproduktion auf Basis von grünem Wasserstoff, Ottobrun
101. Shahabuddin M, Brooks G, Rhamdhani MA (2023) Decarbonisation and hydrogen integration of steel industries: Recent development, challenges and technoeconomic analysis. *Journal of Cleaner Production* 395:136391. doi:10.1016/j.jclepro.2023.136391
102. European Steel Association (2024) European Steel in Figures. Covering 2023, Brüssel
103. (2024) Hydrogen Production | European Hydrogen Observatory. <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/production-trade-and-cost/hydrogen-production>. Zugriffen: 03. Dezember 2024
104. Presseabteilung H (2024) HKM: Dekarbonisierung. <https://www.hkm.de/dekarbonisierung>. Zugriffen: 29. November 2024
105. Limbers J, Böhmer M (2022) Transformationspfade für die Stahlindustrie in Deutschland. Nicht-technische Fassung der Studie
106. Hoffmann C, van Hoey M, Zeumer B (2020) Decarbonization challenge for steel. McKinsey & Company
107. Midrex Technologies, Inc. (2025) Future Processing Options for Hydrogen DRI | Midrex Technologies, Inc. <https://www.midrex.com/tech-article/future-processing-options-for-hydrogen-dri/>. Zugriffen: 06. März 2026
108. (2025) Elektrolysekapazitäten in Deutschland. Stand und Ausblick
109. BMWK (2023) Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie, Berlin
110. EUROFER, IndustriAll Europe (2025) A European Steel Action Plan