

Kathleen Schwarz

Green Steel

Die grüne Transformation der saarländischen Stahlindustrie

*Historische Entwicklung,
Umsetzung und
Herausforderungen
am Beispiel Dillinger
und Saarstahl*

Saarbrücken 2026

Institut für Sozialforschung
und Sozialwirtschaft e.V.
Saarbrücken



Impressum

Kathleen Schwarz: Green Steel. Die grüne Transformation der saarländischen Stahlindustrie
Historische Entwicklung, Umsetzung und Herausforderungen am Beispiel Dillinger und Saar-
stahl.

Institut für Sozialforschung und Sozialwirtschaft (iso) e.V., Saarbrücken (www.iso-institut.de)

Saarbrücken 2026

ISBN: 978-3-00-086937-2

Online-Version zum Download unter www.iso-institut.de/veroeffentlichungen

Vereinsregister: Das Institut für Sozialforschung und Sozialwirtschaft e. V. ist im Vereinsregister des Amtsgerichts Saarbrücken unter der Registernummer 17 VR 3017 als gemeinnütziger Verein eingetragen. Vorsitzender des Vereins ist Prof. Dr. Volker Hielscher. Umsatzsteuer-Identifikationsnummer gemäß § 27a Umsatzsteuergesetz: DE138118160

Der Trendreport wurde im Rahmen des Vorhabens „GreenSteelSkills – Kompetenzen für grünen Stahl“ mit dem Förderkennzeichen 21IVP091B erstellt. Das Vorhaben wird über das Programm „Innovet-Plus“ vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert.

Mit dem Programm InnoVET fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bundesweit Projekte mit dem Ziel, die Attraktivität, Qualität und Gleichwertigkeit der beruflichen Bildung zu steigern. Durchgeführt wird das Programm vom Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB).

INNOVET



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung, Familie, Senioren,
Frauen und Jugend

DURCHGEFÜHRT VOM

bibb

Bundesinstitut für
Berufsbildung

Gefördert als InnoVET PLUS-Projekt aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Familie, Senioren, Frauen und Jugend.

Inhalt

1. Trendreport – „Grüner Stahl“ – die Transformation einer Schlüsselindustrie.....	5
2. Erste Hinweise auf die Verwendung von Eisen und die Eisenverarbeitung	11
2.1 Rückblick auf die historische Entwicklung der saarländischen Stahlindustrie.....	13
2.2 Die Entwicklungsgeschichte des Hochofens	15
3. Die Hochofenroute.....	19
3.1 Vorstufen der Hochofenroute: Sinteranlage und Kokerei	19
3.2 Der Hochofenprozess.....	21
3.3 Vom Roheisen zum Stahlprodukt: Konverter, Stranggussanlage und Walzwerk	24
4. Direktreduktionsanlage (DRI) und Elektrolichtbogenofen (EAF).....	27
4.1 Schritte im DRI-Prozess: Das Grundprinzip der Direktreduktion.....	27
4.2 Der Elektrolichtbogenofen (EAF).....	29
4.3 Transformation von der Hochofenroute zur DRI–EAF-Route: Wegfallende und neue Anlagen und Prozesse.....	31
5. Dekarbonisierung der Stahlindustrie: Herausforderungen, Pfadabhängigkeiten und organisatorische Umsetzung <i>am Beispiel der Unternehmen Dillinger und Saarstahl</i>	35
5.1 Governance und Genehmigungen: Steuerung zwischen Recht, Technik und Politik	36
5.2 Technologischer Umbau der Prozesskette: Hot-Link bei der DRI/EAF-Route	37
5.3 Energie- und Wasserstoffinfrastruktur: Zwischen Versorgungssicherheit und Volatilität.....	39
5.4 Sicherheit, Qualifikation und Kompetenzaufbau: Neue Curricula für neue Risiken	42
5.5 Logistik und Rohstoffversorgung: Der Paradigmenwechsel zum Schrott	42
5.6 Produktions- und Personalorganisation im Parallelbetrieb: „Transformation am offenen Herzen“ – am Beispiel Dillinger und Saarstahl.....	43
5.7 Inbetriebnahme-Prozesse der neuen Anlagen.....	45
5.8 Auswirkungen der Transformation auf die einzelnen Bereiche der Stahlproduktion...	46
5.9 Ökonomische und politische Rahmenbedingungen der Dekarbonisierung.....	48
6. Literaturverzeichnis	53

1.

Trendreport - „Grüner Stahl“ – die Transformation einer Schlüsselindustrie

Seit mehr als einem Jahrhundert bildet die Stahlindustrie das industrielle Rückgrat Europas – und insbesondere Deutschlands. Sie liefert die Grundlage für zentrale Wertschöpfungsketten, von der Automobilindustrie über den Maschinenbau bis hin zum Bauwesen. Heute ist dieser industrielle Kernbereich jedoch mit einer doppelten Herausforderung konfrontiert: dem globalen Wettbewerb einerseits und dem klimapolitischen Druck zur Dekarbonisierung andererseits. Die Transformation zur klimaneutralen Stahlproduktion ist nicht nur eine ökologische Notwendigkeit, sondern auch eine strategische Frage von Wettbewerbsfähigkeit, Innovationskraft und gesellschaftlicher Verantwortung.

Die Stahlindustrie zählt zu den größten Verursachern industrieller Treibhausgasemissionen in Deutschland. Etwa dreißig Prozent der Emissionen des gesamten Industriesektors gehen auf die Stahlproduktion zurück. Diese Tatsache macht deutlich, dass die Transformation der Branche eine zentrale Rolle für die nationale Klimapolitik spielt (KEI

2025). Nach dem Klimaschutzgesetz hat sich Deutschland verpflichtet, seine Emissionen bis 2030 um mindestens 65 Prozent und bis 2040 um mindestens 88 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 zu reduzieren, bevor spätestens 2045 Treibhausgasneutralität erreicht sein soll (UBA 2024). Damit diese Zielmarken realistisch eingehalten werden können, muss gerade in jenen Industriezweigen – wie der Stahlproduktion – angesetzt werden, in denen die größten Emissionsmengen entstehen. Die Stahlindustrie spielt deshalb eine zentrale Rolle in der Dekarbonisierung der deutschen Wirtschaft, da in keiner anderen Branche vergleichbare Mengen an CO₂ so schnell reduziert werden können. Allerdings stehen diesem Prozess hohe Energiekosten und globale Überkapazitäten auf den Stahlmärkten entgegen, die ohne entsprechende Rahmenbedingungen seitens der EU die Rentabilität gefährden können (WV Stahl 2022).

Traditionell wird Stahl in Deutschland überwiegend über die Hochofenroute hergestellt. Rund zwei Drittel der in Deutschland erzeugten Produktionsmenge entstehen noch immer auf diesem Weg. Eine CO₂-Reduktion um 30 Prozent in der Stahlindustrie würde jährlich 17 Millionen Tonnen CO₂ einsparen. Eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes um 95 Prozent könnte 55 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr einsparen (BMW i 2021; WV Stahl 2023).

Demgegenüber steht die Elektrostahlproduktion im Elektrolichtbogenofen, die etwa ein Drittel der Gesamtmenge ausmacht. Sie basiert in hohem Maße auf Schrottreycling und verursacht damit schon heute deutlich geringere CO₂-Emissionen (WV Stahl 2024). Wenn die Branche die Klimaziele erreichen will, reicht es nicht aus, allein den bestehenden Anteil an recyceltem Stahlschrott zu halten. Daher besteht die Notwendigkeit die pri-

märe Hochofenproduktion in den kommenden Jahren auf emissionsarme Verfahren umzustellen – wie z. B. Direktreduktionsanlagen (SZAG 2020).

In Politik, Medien und Fachwelt ist in diesem Zusammenhang häufig von „grünem Stahl“ die Rede. Gemeint ist damit kein einheitlich definiertes Produkt, sondern eine Sammelbezeichnung für Stahl, dessen Herstellung im Vergleich zur konventionellen Route deutlich emissionsärmer verläuft. Unter diesem Begriff finden sich unterschiedliche Konzepte: Stahl, der mit Wasserstoff anstelle von Kohle reduziert wird, Produkte mit zertifiziertem oder bilanziell ausgewiesenem Emissionsgehalt, CO₂-reduzierte Varianten oder – in der Vision für die Zukunft – tatsächlich klimaneutral erzeugte Stähle. In der Realität sind derzeit vor allem CO₂-reduzierte Stähle verfügbar, während vollständig klimaneutrale Produkte noch nicht in marktrelevanten Mengen hergestellt werden (IEA 2024). Wenn aktuell von grünem Stahl die Rede ist, sind in der Regel CO₂-reduzierte Varianten gemeint. Langfristiges Ziel ist jedoch nahezu emissionsfreier Stahl. Als Schlüsselbaustein einer klimaneutralen Industriegesellschaft. Der Weg dorthin führt über neue Prozessketten, über Wasserstoff als Energieträger, über den massiven Ausbau erneuerbarer Energien und über die konsequente Nutzung von Recyclingpotenzialen (ibau 2025).

Technologisch gelten insbesondere zwei Ansätze als entscheidend für die Dekarbonisierung der Branche. Die wasserstoffbasierte Direktreduktion in Kombination mit dem Elektrolichtbogenofen und der verstärkte Einsatz von Schrott. In der Direktreduktion wird Eisenerz nicht mehr im Hochofen, sondern in speziellen Anlagen unter Einsatz eines gasförmigen Reduktionsmittels zu Eisenschwamm verarbeitet. Bislang kommt dabei häufig Erdgas zum Einsatz, das schon eine gewisse Emissionsminderung gegenüber

dem Einsatz von Koks im traditionellen Hochofen hat (SZAG 2020; DECHEMA 2024).

Perspektivisch soll dieses Erdgas jedoch vollständig durch grünen Wasserstoff ersetzt werden. Der chemische Prozess selbst bleibt vergleichbar. Der Wasserstoff verbindet sich mit dem Sauerstoff im Eisenerz, allerdings entsteht als Nebenprodukt lediglich Wasser, nicht mehr Kohlendioxid. Der Eisenschwamm wird anschließend im Elektrolichtbogenofen eingeschmolzen und zu Rohstahl weiterverarbeitet. Der seinerseits mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben werden kann. Damit wird das Verfahren zu einem zentralen Hebel für die Herstellung nahezu emissionsfreier Stähle (BMUV 2023).

Neben der Transformation der Stahlproduktion spielt das Recycling eine immer größere Rolle. Stahl ist nahezu hundert Prozent wiederverwertbar. Durch den verstärkten Einsatz von Schrott können Materialkreisläufe geschlossen und erhebliche Mengen an Emissionen eingespart werden. Grenzen ergeben sich allerdings durch die Qualität und Verfügbarkeit von Schrott sowie durch die Stromintensität der Elektrostaalroute. Auch hier entscheidet der Strommix darüber, wie klimafreundlich das Verfahren tatsächlich ist (Fraunhofer IKTS 2023; DECHEMA 2024).

Politische Rahmenbedingungen der EU und Deutschlands

Das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS), das 2005 in Kraft trat, gilt als weltweit erstes und eines der umfangreichsten marktbasierten Instrumente zur Begrenzung von CO₂-Emissionen. Es basiert auf dem „Cap-and-Trade“-Prinzip: Eine festgelegte Obergrenze („Cap“) limitiert die jährlichen Emissionen in den Sektoren Industrie und Energie. Betroffene Unternehmen benötigen für jede emittierte Tonne CO₂ ein entsprechendes Zertifikat – 1 Tonne = 1 Zertifikat.

Unternehmen, die weniger CO₂ ausstoßen, können ihre überschüssigen Zertifikate verkaufen; wer mehr ausstößt, ist verpflichtet zu kaufen. Seit der Einführung durchläuft das EU-ETS kontinuierliche Anpassungen, um die EU-Klimaziele – mindestens 55 % Emissionsreduktion bis 2030 und Klimaneutralität bis 2050 – zu erfüllen (UBA 2023). Im Rahmen des „Fit-for-55“-Pakets wurde die EU-Richtlinie 2023/959 im Mai 2023 verabschiedet, deren Ziel einerseits ein fairer Wettbewerb ist. So werden ab 2026 nicht nur EU-Produkte, sondern auch auf importierte Waren entsprechende Zertifikate fällig. Damit soll verhindert werden, dass keine Wettbewerbsvorteile mehr für Importe aus Ländern mit günstigeren, klimafreundlichen Regulierungen bestehen. Für jede importierte Ware müssen dann CBAM-Zertifikate erworben werden (BMWK 2024d; DACHSER 2024). Betroffen sind importierte Waren aus Branchen wie Eisen, Stahl, Aluminium, Zement, Dünger, Wasserstoff und Elektrizität. Andererseits soll verhindert werden, dass emissionsintensivere Produktion in Länder mit weniger strengen Umweltschutzanforderungen ausgelagert wird – Schutz vor „Carbon Leakage“ (Wikipedia 2025a). Zusammenfassend kann man sagen, dass das EU-Emissionshandelssystem (EU-ETS) die Produktion CO₂ emissionsintensiver Industrien deutlich verteuert. Je weniger CO₂ ausgestoßen werden darf, desto wertvoller und teurer werden Zertifikate – das erhöht Produktionskosten für CO₂-intensive Anlagen. Durch die Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) sollen die CO₂-Kosten bei Importen ausbalanciert werden, um Wettbewerbsverzerrungen zu verhindern Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi 2020; DWV 2023).

Eine weitere Grundlage für die Dekarbonisierung der europäischen bzw. deutschen Stahlindustrie ist das Pariser Klimaabkommen: Es wurde im Dezember 2015 auf der

„21. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (COP21)“ in Paris verabschiedet und ist ein Jahr später im November 2016 in Kraft getreten. Das Pariser Klimaabkommen selbst richtet sich nicht spezifisch an die Stahlindustrie – es legt jedoch globale Rahmenbedingungen fest, die unmittelbare Auswirkungen auf diesen energieintensiven Sektor haben. Zunächst einmal strebt das Abkommen an, den globalen Temperaturanstieg auf deutlich unter 2 °C, möglichst auf 1,5 °C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die weltweiten Treibhausgas-Emissionen möglichst bald ihren Höhepunkt erreichen – spätestens bis 2025 – und bis 2030 um etwa 43 % gegenüber dem Niveau von 2010 sinken. Besonders relevant für den Stahlsektor ist in diesem Zusammenhang, dass die Treibhausgas-Emissionen der Stahlindustrie bis 2030 um mindestens 50 % gesenkt und bis 2050 um rund 95 % reduziert werden. Diese Dringlichkeit ergibt sich aus dem Anspruch, bis Mitte des Jahrhunderts Netto-Null-Emissionen zu erreichen (UNFCCC 2018).

Diese Vorgaben gelten nicht nur national, sondern auch als Teil der EU-Verpflichtung (gemeinsame 2030-Reduktion von 55 bis 65 %) (BMWK 2024). Länder mit deutlich emissionsstärkeren Volkswirtschaften wie Deutschland haben sich sogar zu ehrgeizigeren nationalen Zielen verpflichtet. Dazu gehört die Verpflichtung, bis Mitte der 2040er Jahre klimaneutral zu sein – also deutlich vor dem globalen Zielzeitraum zur Mitte des Jahrhunderts. Diese verschärfte Festlegung der CO₂-Obergrenze und die strengere Preisstruktur erhöhen die Kosten für CO₂-intensive Produktionsprozesse deutlich. Importeure müssen CO₂-Kosten nun zahlen – das macht CO₂-intensive Importware teurer und schützt EU-Hersteller. Unternehmen wie die Stahlindustrie, die auf

moderne, emissionsarme Techniken wie Elektrolichtbogenöfen (EAF), grünen Wasserstoff oder Carbon-Capture-Lösungen setzen, sollen dadurch langfristig einen Markt- und Kostenvorteil gewinnen (UBA 2024).

Mehr als nur technologische Veränderungen: Politische und soziale Dimensionen

Die Transformation ist nicht nur technologischer Natur. Sie ist eingebettet in komplexe politische, ökonomische und institutionelle Rahmenbedingungen und hat weitreichende Veränderungen für Beschäftigung, Qualifikationen und regionale Wertschöpfung. Während die Politik durch milliardenschwere Förderprogramme zentrale Weichen stellt, wird erst in einigen Jahren absehbar sein, ob der „grüne Stahl“ die Wettbewerbsfähigkeit der Standorte sichern kann. Für die Praxis bedeutet dies Chancen – etwa durch die Sicherung von Arbeitsplätzen und die Positionierung als „grüner Vorreiter“ – zugleich aber auch erhebliche Herausforderungen, etwa in Bezug auf Energieversorgung, Investitionssicherheit und betriebliche Anpassungsprozesse (Germanwatch e.V. 2023).

Das Saarland als Vorreiter für „grünen Stahl“

Die Stahlindustrie gehört seit mehr als drei Jahrhunderten zu den tragenden Säulen der saarländischen Wirtschaft. Die Standorte Dillingen und Völklingen zählt die saarländische Stahlindustrie seit Jahrzehnten zu den industriellen Eckpfeilern. Mit mehreren tausend Arbeitsplätzen in der Produktion sowie in vor- und nachgelagerten Branchen ist sie bis heute einer der wichtigsten Arbeitgeber der Region. Die Stahlindustrie prägt die industrielle Identität des Saarlandes, bildet die Basis für regionale Wertschöpfungsketten

und ist eng mit politischen Entscheidungen auf Landes- und Bundesebene verknüpft. Als Schlüsselbranche war sie immer wieder Gegenstand industriepolitischer Maßnahmen – von finanziellen Hilfen in der Montan-krise bis hin zu aktuellen milliardenschweren Transformationsprogrammen. Damit ist sie nicht nur ein wirtschaftlicher Standortfaktor, sondern zugleich zentral für sozial- und arbeitsmarktpolitische Entwicklungen. Politische Vorgaben zur CO₂-Reduktion, europäische Klimaziele und globale Marktdynamiken haben dazu geführt, dass die Stahl-Holding-Saar (SHS) an ihren stahlproduzierenden Standorten Dillingen (Dillinger Hütte) und Völklingen (Saarstahl) die traditionelle Hochofenroute schrittweise durch eine auf „grüne“ Wasserstoff basierende Direktreduktion (DRI) und Elektrolichtbogenöfen (EAF) ersetzen will. Die geplanten Investitionen gehen weit über Fragen der Anlagentechnik hinaus. Sie umfassen den Aufbau neuer Infrastrukturen für grünen Wasserstoff und erneuerbare Energien ebenso wie die Qualifizierung der Beschäftigten und die Sicherung der industriellen Wertschöpfung in einer Zeit tiefgreifender Veränderungen. Der Neubau entsprechender Anlagen im Saarland markiert einen entscheidenden Schritt in Richtung klimaneutraler Stahlproduktion in Deutschland (SHS 2025).

Zum Inhalt des Trendreports

Dieser Trendreport wurde im Rahmen des Projektes GreenSteelSkills verfasst. Mit dem Bau der DRI-Anlage sowie der EAF-Öfen verändern sich aufgrund der neuen Technologien neben den Arbeitsprozessen und Tätigkeitsprofilen auch ganze Berufsbilder. Gleichzeitig müssen Ausbildungsprogramme aktualisiert und erweitert werden, um die Zukunftsfähigkeit und die Attraktivität dieser Branche zu sichern. Ziel des Projektes ist es, vor diesem Hintergrund effektive und

zukunftsgerichtete Aus- und Weiterbildungs-konzepte und -formate für eine nachhaltige und zukunftsfähige Stahlindustrie zu entwickeln, die sich in den betrieblichen Alltag integrieren lassen. Das Institut für Sozialforschung und Sozialwirtschaft analysiert in diesem Kontext die gegenwärtigen und zukünftigen Arbeitsformen und identifiziert die entsprechenden Weiterbildungs- und Kompetenzbedarfe in den betroffenen Bereichen. Damit können die Auswirkungen der Transformation an die Arbeitsanforderungen der Stahlbeschäftigten aus einer arbeitswissenschaftlichen Perspektive nachgezeichnet werden.

Die vorliegenden Kapitel sollen die komplexe Gemengelage der Transformationsprozesse im Zusammenhang mit dem technologischen Wandel von der aktuellen Hochofenroute, die mit fossilen Brennstoffen wie Koks betrieben wird, hin zur „grünen“ wasserstoff- und strombasierten DRI/EAF-Route beschreiben:

- ... Beginnend mit einem Rückblick auf die historische Entwicklung der Eisen- und Stahlproduktion mit Bezug auf die Entwicklung im Saarland sowie die Entwicklung des Hochofens selbst.
- ... Daraufhin folgt die Beschreibung der Hochofenroute mit Schwerpunktsetzung auf den Hochofenprozess.
- ... Anschließend wird der Prozess der wasserstoff- und strombasierten DRI/EAF-Route dargestellt, um den CO₂-Ausstoß der Stahlindustrie in Deutschland bis 2045 auf ein Minimum zu reduzieren.
- ... Danach folgt die Darstellung der Unterschiede zwischen der Hochofen-Route in Bezug auf die DRI/EAF-Route.
- ... Darauf aufbauend werden die verschiedenen Herausforderungen der grünen Transformation der Stahlindustrie am

Beispiel Dillinger und Saarstahl beschrieben. Dabei geht es um die technologischen Grundlagen, die Anforderungen an die Umsetzung der Neubauprojekte sowie die sozialen, organisatorischen, logistischen und ökonomischen Herausforderungen für Unternehmen und Beschäftigte der Stahlindustrie.

2.

Erste Hinweise auf die Verwendung von Eisen und die Eisenverarbeitung

Die Eisen- und Stahlindustrie ist einer der ältesten und bis heute bedeutendsten Industriezweige weltweit. Seit rund 3000 Jahren bildet Eisen eine „wesentliche materielle Grundlage für die Entwicklung der menschlichen Kultur und Zivilisation“ (VDEh 2007). Im Laufe der Zeit wurden die Verfahren und Werkzeuge zur Gewinnung von Eisen aus seinen Erzen stetig verbessert. Insbesondere ihr Einfluss auf das Industriezeitalter in Amerika und Europa mit dem Bau von Hochöfen ab dem 19. Jahrhundert und die damit einhergehende rasante technische Entwicklung brachten große gesellschaftliche Veränderungen mit sich. Unverändert blieb jedoch die zentrale Herausforderung, mithilfe von Energie und durch den Einsatz verschiedener technischer Verfahren das Eisenerz so aufzubereiten, dass es wirtschaftlich genutzt und produziert werden kann (VDEh 2007).

Die ältesten Belege für die Verwendung von Eisen lassen sich insbesondere in Ägypten, Mesopotamien und Sumer bis etwa 4000 v.

Chr. zurückverfolgen. Die Ägypter verwendeten dabei natürlich vorkommendes eisenhaltiges Meteoritengestein, das hauptsächlich für Schmuck oder als Spitzen von Waffen Verwendung fand. Ein Beispiel ist der berühmte Dolch aus dem Grab des Tutanchamun ca. 1350 v. Chr (siehe Abbildung 1). Da das Eisen bereits in metallischer Form vorlag, wurde es kalt geschmiedet – also erhitzt oder gehämmert, oft mit Bronze- oder Steinwerkzeugen, um es zu formen. (Interstuhl 2025; Comelli et al. 2016).



Abbildung 1: Goldene Maske Tutanchamun, Urheber: travelview – stock.adobe.com

Bereits zwischen 3000 und 2000 v. Chr. wurde in Mesopotamien, Anatolien und Ägypten geschmolzenes Eisen erzeugt, das sich durch das Fehlen von Nickel deutlich vom Meteoriteneisen unterschied. Dieses Metall hatte zu jener Zeit vor allem eine symbolische Bedeutung, wurde vorwiegend für kulturelle Zwecke verwendet und galt als kostbarer als Gold. Um 2200 v. Chr. wurden in der heutigen Türkei Beigaben von Eisengegenständen in einem Fürstengrab nachgewiesen. Vermutlich entstand es in Form von Schwammeisen als zufälliges Nebenprodukt bei der Herstellung von Bronze. Ab etwa 1600 bis 1200 v. Chr. nahm die Nutzung von Eisen allmählich zu. Insbesondere die Hethiter scheinen in dieser Epoche eine Methode entwickelt zu haben, Eisen gezielt und in größerem Umfang herzustellen. Dennoch verdrängte es die Bronze zunächst nicht. Vielmehr besaßen die Hethiter in ihrem Reich, das im Gebiet der heutigen Türkei lag,

ein nahezu exklusives Wissen um die Eisenverarbeitung, was ihren militärischen und politischen Aufstieg begünstigte. Erst nach dem Zerfall des Hethiterreiches um 1200 v. Chr. verbreitete sich dieses Wissen im Nahen Osten. In dieser Phase setzte der Übergang von der Bronze- zur Eisenzeit ein. Neben der besseren Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit des Eisens spielte vermutlich auch ein Engpass bei Zinn, das für die Bronzeherstellung unerlässlich war, eine entscheidende Rolle. Zusätzlich haben die überlegenen militärischen Eigenschaften eiserner Waffen und Rüstungen im Vergleich zu Bronzekonstruktionen den Wandel beschleunigt. Es wird vermutet, dass Eisen zufällig als Nebenprodukt der Bronzeherstellung, etwa in Form von Schwammeisen entstand. Bei der weiteren Bearbeitung mit Holzkohle gelangte Kohlenstoff in das Metall, sodass ein zumindest oberflächlich gehärteter Stahl entstand. Durch gezieltes Härten – also das kontrollierte und fachgerechte Abkühlen in Flüssigkeiten wie Wasser oder Öl – konnten Werkstücke geschaffen werden, die deutlich elastischer und härter waren als Bronze (Kaelin 2023; Informationsblätter Stahl o. J.; Lernhelfer.de o. J.).

Das Wissen über die Bearbeitung dieses Rohstoffs verbreitete sich von Anatolien aus nach Südosteuropa und erreichte schließlich Mitteleuropa. In einer ersten Phase, die zwischen dem 13. und 8. Jahrhundert v. Chr. lag, breitete sich die Technik von Griechenland ausgehend über Mitteleuropa bis in den Norden Dänemarks aus. In der Zeit vom 8. bis zum 5. Jahrhundert v. Chr. gelangte die Eisenverarbeitung schließlich auch in die westlichen Regionen Europas – darunter England, Frankreich und Spanien – sowie in den Norden (Schweden, Norwegen) und Osten (Russland) (Geolitho Stiftung 1999).

Seit dem 8. Jahrhundert v. Chr. nutzten keltische Stämme in Süd-, Mittel-, West- und

Teilen Nordeuropas Eisen für die Herstellung von Waffen wie Schwertern und Speeren, aber auch für landwirtschaftliche Geräte wie Pflugscharen sowie für medizinische Instrumente mit hoher Präzision. So ist im Siegerland, das damals keltisch geprägt war, ist bereits um 400 v. Chr. Eisenverhüttung nachweisbar. Aus dem 1. vorchristlichen Jahrhundert stammen zudem Funde von Eisenwerkzeugen und sechs vierrädrigen Wagen aus Dejbjerg in Jütland, deren Radlager ebenfalls aus Eisen gefertigt waren (Geolitho Stiftung 1999).

Während der römischen Epoche existierten größere Hüttenanlagen in Italien, Spanien, Britannien, am Rhein und in der heutigen Steiermark (bekannt für das sogenannte „norische Eisen“). Römische Schmiede stellten spätestens seit dem 2. Jahrhundert v. Chr. Rüstungsteile wie Helme, Schuppen- und Kettenhemden, Schilde sowie Waffen (Speer) oder das Kurzschwert her. Viele dieser Techniken wurden von keltischen Gruppen übernommen. Nach dem Rückzug der Römer um 260 n. Chr. setzten germanische Völker wie die Alemannen die Eisenproduktion fort. Mit dem Zerfall des Weströmischen Reiches kam der Erzabbau in Germanien, Gallien und Spanien weitgehend zum Stillstand; zahlreiche Bergwerke verfielen und gerieten im frühen Mittelalter in Vergessenheit. Erst ab der Mitte des 9. Jahrhunderts kam es zu einer Wiederaufnahme der Eisengewinnung. Zeitgenössische Quellen berichten von einem intensiven Eisenbergbau durch die Franken, die in der Region vom Main bis ins Elsass siedelten. Bis in das späte Mittelalter (1300 bis 1500 n. Chr.) hinein war die Verhüttungstechnik des Rennofens vorherrschend. Mit dieser Methode konnten Temperaturen bis etwa 1.300 °C erreicht werden, was ausreichte, um schmiedbares Eisen herzustellen. Über viele Jahrhunderte blieb das Grundprinzip unverändert, auch

wenn ab dem Frühmittelalter Doppelrennöfen eingeführt wurden, die eine höhere Ausbeute ermöglichten (Geolitho Stiftung 1999).

2.1

Rückblick auf die historische Entwicklung der saarländischen Stahlindustrie



Abbildung 2: Die beleuchtete Völklinger Hütte. Quelle: Weltkulturerbe Völklinger Hütte o.J.

Die Historie der saarländischen Eisenindustrie lässt sich bis auf die jüngere vorrömische Eisenzeit von etwa 450 v. Chr. bis zur Zeit um die Geburt Christi zurückverfolgen. Für diese Zeit finden sich Belege, die davon zeugen, dass Eisen im heutigen Saarland in Rennfeuern hergestellt wurde. Für das Mittelalter fehlen entsprechende Zeugnisse, die eisenschaffende Gewerke belegen würden. Für das heutige Saargebiet lassen sich aber aus der römischen Epoche Spuren von Schmelzöfen nachweisen, die im Bereich zwischen Friedrichsthal und Neunkirchen lagen. Eine erste schriftliche Erwähnung der Eisenverarbeitung in der Region Neunkirchen findet sich in einer Vereinbarung aus dem Jahr 1430, in der von „isenschmitten und kolegruben im Sindertal“ die Rede ist,

sowie 1431 für Eisenverhüttung am Halberg. Offen bleibt allerdings, ob es sich dabei schon um Anlagen handelte, die die Herstellung von Gusseisen ermöglichten. Mit der Nutzung der Wasserkraft zum Antrieb der Öfen begann eine dynamische Entwicklung der Eisenindustrie. Die lokal verfügbaren Rohstoffe – erzhaltiges Gestein, Kohle beziehungsweise Holz sowie Wasserläufe zur Energiegewinnung für Blasebälge und Hammerwerke – bildeten die Basis, um Eisen herzustellen und dieses weiter zu Waffen, Werkzeugen und Alltagsgegenständen zu verarbeiten. Die im Vergleich zu heutigen Hochöfen eher kleinen Eisenhütten wechselten aufgrund fehlender Infrastruktur und Transportmöglichkeiten – in Abhängigkeit von ausreichenden Wasservorkommen und Rohstoffen – häufig ihren Standort (SHS 2012; Mensch und Bergbau e.V. 2012; IHK o.J.).

Bereits im Jahr 1577 ist im heutigen Nonnweiler das Bestehen einer Eisenhütte urkundlich nachweisbar. Wenige Jahre später, um 1593, begann in Neunkirchen an der Blies die erste gewerblich betriebene Eisenschmelze. Viele dieser frühen Hütten und die dazugehörigen Dokumente fielen jedoch den Zerstörungen des Dreißigjährigen Krieges zum Opfer. Im südlicheren Saarraum entstanden in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts weitere Anlagen. So genehmigte Graf Johann von Nassau-Saarbrücken in den Jahren 1572 und 1585 den Bau einer Hütte in Geislautern, die allerdings 1628 kriegsbedingt stillgelegt werden musste. Auch der Graf von Ottweiler ließ um 1590/93 eine Schmelze in Neunkirchen errichten, die 1635 zerstört wurde. Nach dem Westfälischen Frieden von 1648 setzte der Wiederaufbau der Eisenhütten im Gebiet nur langsam ein. Im Raum Birkenfeld entstand 1670 die Asbacher Hütte, während in Dillingen der Marquis Charles Henri de Lenoncourt von

Ludwig XIV. die Erlaubnis zum Bau einer Eisenhütte erhielt (SHS 2012; Mensch und Bergbau e.V. 2012; IHK o.J.).

Die erste Hälfte des 18. Jahrhunderts gilt als Blütezeit der saarländischen Eisenhüttenindustrie. In kurzen zeitlichen Abständen entstanden zahlreiche Werke, die sich insbesondere durch die Herstellung gusseiserner Kamin- und Takenplatten (Ofenplatten) profilierten. Bedeutende Standorte dieser Phase waren Bettingen (1720), Nunkirchen (1724), Fischbach (1728), St. Ingbert (1733), Münchweiler (1738) und die Halberger Hütte (1756). Diese Expansionsphase verdeutlicht, wie eng technologische Kompetenz, regionale Ressourcenverfügbarkeit und wachsende Nachfrage nach Eisenprodukten miteinander verflochten waren.

Herausforderungen und frühe Modernisierung (spätes 18. und frühes 19. Jahrhundert)

Ab der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts sah sich die Eisenindustrie erheblichen Herausforderungen gegenüber. Der Mangel an Holzkohle entwickelte sich zu einem strukturellen Problem, sodass erste Experimente mit Steinkohle durchgeführt wurden, wenngleich diese zunächst wenig erfolgreich blieben. Mehrere Hütten mussten aufgrund wirtschaftlicher Schwierigkeiten den Betrieb einstellen, darunter die Halberger Hütte (1773) und die Sulzbacher Hütte (1776). Zugleich führte die finanzielle Not der Landesherren zu wechselnden Besitz- und Pachtverhältnissen. Mit der Französischen Revolution gelangten zahlreiche Hütten unter staatliche Verwaltung und wurden in den Dienst militärischer Bedürfnisse gestellt. Gleichzeitig begann die Ära einflussreicher Unternehmerfamilien. Die Gebrüder Stumm sicherten sich ab 1806 zentrale Standorte wie Neunkirchen, Halberg und Fischbach, während die

Familie Krämer 1804 die Hütte St. Ingbert erwarb. Technologische Neuerungen – etwa der Bau eines Blechwalzwerks nach englischem Vorbild in Dillingen (1802) – markieren zudem eine frühe Phase industrieller Modernisierung. Die Völklinger Hütte (Abb.2) wurde im Jahr 1873 gegründet und 1986 stillgelegt. Seit den 1990er Jahren ist sie Industriedenkmal und UNESCO-Weltkulturerbe (SHS 2012; Wikipedia 2024; MBK o.J. a).



Abbildung 3: Dillinger Hütte heute Quelle: Dillinger o.J.

Die Gründung der Dillinger Hütte ist datiert auf das Jahr 1685. In diesem Jahr übertrug der französische König Ludwig XIV. dem Marquis Charles Henri

Gaspard de Lenoncourt die Genehmigung zur Errichtung einer Eisenhütte mit Schmelzofen nahe der Festung Saarlouis. Diese Hütte umfasste bei Fertigstellung einen 20 Fuß hohen Schmelzofen, betrieben mit zwei Blasebälgen, sowie eine Gießerei für Sand- und Lehmguß und einen Luppenhammer zur Weiterverarbeitung (Nagel und Stabeisen). Der Betrieb wurde über Wasserkraft gesteuert mit einem Weiher zur Wasservorrathaltung, gespeist aus der Prims (Wikipedia 2024). Lokalhistorisch wird ebenfalls erwähnt, dass dieser Aufbau markant die wirtschaftliche Entwicklung von Dillingen einleitete, denn aus der Anfangsproduktion entstand das Weltunternehmen Dillinger Hütte

(Industriekultur 2010; Dillingen o. J.; Wikipedia 2024).

Konsolidierung, Spezialisierung und Schließungen im 19. Jahrhundert

Im Verlauf des 19. Jahrhunderts setzte eine deutliche Konsolidierung der saarländischen Eisenhüttenlandschaft ein. Während einige Werke ihre Produktion einstellten – spezialisierten sich andere erfolgreich. Die Halberger Hütte konzentrierte sich ab 1867 auf die Röhrenproduktion und erschloss damit ein zukunftssträchtiges Marktsegment. Insgesamt wurde die Region zunehmend von wenigen großen Akteuren geprägt, die durch Kapitalstärke und technologische Innovationskraft den Wettbewerb dominierten (Kaminplatten-Sammlung Kremer o. J.).

Die Entwicklung der saarländischen Eisenhüttenindustrie war durch ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Faktoren geprägt. Die lokalen Eisenerzvorkommen sowie die Verfügbarkeit von Holz und Wasserkraft bildeten die natürliche Grundlage, während deren Verknappung den technischen Wandel der Steinkohleanwendung vorangetrieben hat. Technologische Innovationen – von der Nutzung der Wasserkraft über den Plattenguss bis hin zu Walzwerken – eröffneten neue Produktionsmöglichkeiten und neue Märkte. Darüber hinaus wirkten wirtschaftliche Rahmenbedingungen und Marktbedürfnisse als entscheidende Impulse. (MBK o. J.a; MBK o. J.b; Saar-Nostalgie o. J.)

2.2

Die Entwicklungsgeschichte des Hochofens (Koks)

Durch eine Mischung aus Zufall, Beobachtung und erfinderischem Handeln entwickelte sich die Technik der Eisenverarbeitung überall dort, wo es ausreichend reduzierbare Erze und genügend Holz gab, um mit Holzkohle eine Verhüttung durchzuführen. Dieser Prozess verlief in verschiedenen Regionen parallel, allerdings auf unterschiedlichen Entwicklungsstufen.

Da Eisen eine große technische und wirtschaftliche Bedeutung erlangte, wurden Kenntnisse und Erfahrungen häufig geheim gehalten. Dadurch blieben bestimmte Verfahren lokal begrenzt oder verbreiteten sich erst deutlich später in anderen Gegenden. Die Entwicklung der Eisenproduktion lässt sich vor allem anhand der eingesetzten Ofentypen nachvollziehen, die im Folgenden beschrieben werden (VDEh 2007).

Eisenverhüttung im Rennfeuerofen

Die sogenannten Rennfeuer oder Rennöfen waren einfache, niedrige Gruben- oder Schachtöfen, die meist aus Lehm, Bruchsteinen oder Findlingen errichtet wurden. In ihnen wurde aufbereitetes, mit Holzkohle vermischtes Eisenerz zu schmiedbarem Eisen verarbeitet. Während des Prozesses schmolzen die nichtmetallischen Bestandteile des Erzes und sammelten sich als Schlacke, während das Eisen selbst in fester Form reduziert wurde. Ursprünglich erfolgte die Belüftung der Öfen allein durch natürlichen Luftzug. Später kamen hand- oder fußbetriebene Blasebälge hinzu, die den Luftstrom verstärkten. Das Endprodukt war eine sogenannte Luppe: ein unförmiger Klumpen

aus schmiedbarem Eisen, vermischt mit Restschlacken sowie einzelnen verbliebenen Erz- und Kohlestücken. Diese wurden mechanisch zerkleinert, um die Eisenstücke freizulegen, die anschließend von Hand zusammengeschiedet und zu Werkzeugen oder Gebrauchsgegenständen weiterverarbeitet wurden. An diesem grundlegenden Verfahren änderte sich bis ins Mittelalter kaum etwas (chemieseiten.de o. J.; VDEh 2007).



Abbildung 4: Ruinen einer mittelalterlichen Eisenschmelze, Urheber; vrabelpeter1- stock.adobe.com

Erst im 10. Jahrhundert brachte das Wasserrad eine tiefgreifende Veränderung in der Eisenproduktion. Durch die Nutzung der Wasserkraft wurde die Lage der Verhüttungsstätten weniger von den Erzvorkommen, sondern stärker von wasserreichen Tälern bestimmt. Die mit Wasserkraft betriebenen Blasebälge erzeugten einen deutlich höheren Luftdruck, wodurch es möglich wurde, wesentlich größere Ofenanlagen zu errichten. Diese produzierten Luppen von bis zu 100 Kilogramm Gewicht. Solche massiven Eisenklumpen, die ebenfalls Schlackenreste enthielten, wurden „Wölfe“ oder „Stücke“ genannt – daher leitet sich auch die Bezeichnung „Stückofen“ ab (VDEh 2007).

Diese Technik des Rennverfahrens blieb bis ins 14. Jahrhundert gebräuchlich, bis sie durch effektivere Methoden verdrängt wurde. Im Rennofen wurden dabei abwech-

selnd Lagen aus Holzkohle und Erz eingebracht. Unter diesen Bedingungen entstanden Temperaturen von etwa 800 bis 900 °C, die zur Bildung einer Luppe führten. Um diese zu beseitigen, wurde die Luppe durch Schmieden weiterverarbeitet, was bereits eine vergleichsweise hohe Materialqualität hervorbrachte. Parallel zu dieser Entwicklung entstand die Technik des Härtens von Eisen, die vor allem bei der Herstellung von Waffen Anwendung fand und eine bedeutende Innovation darstellte (Interstahl o. J.).

Die historische Entwicklung der Hochöfen

Im Verlauf des 12. Jahrhunderts gelang es, die Wärme in den Öfen so wirkungsvoll zu nutzen, dass erstmals die Schmelztemperaturen von Eisenerzen erreicht wurden. Damit setzte die Entwicklung des Hochofens ein. Zunächst war das dabei entstehende flüssige Produkt jedoch unerwünscht – was sich auch in den Bezeichnungen widerspiegelt. Es wurde als „rohes“ Eisen, „Dreckseisen“ oder im Englischen abwertend als *pig iron* („Schweineisen“) bezeichnet. Trotz dieser anfänglichen Ablehnung entwickelte sich das sogenannte Roheisen später zum zentralen Ausgangsstoff der modernen Stahlerzeugung (VDEh 2007).

Die ersten Hochöfen entwickelten sich Mitte des 14. Jahrhunderts aus den alten Rennöfen. Diese wurden immer höher gebaut und mit stärkeren Gebläsen ausgestattet. Erstmals erhielt man damit anstelle der Luppe flüssiges Eisen. Die Schmelzöfen, in denen Roheisen gewonnen wurde, nannte man anfangs Floßöfen. Das gewonnene Roheisen aus dem Hochofen enthält sehr viel Kohlenstoff und ist damit extrem spröde. Trotzdem ermöglichte erst das Roheisen den Übergang zum Frischeisen und damit zur Stahl-

produktion. Die Hochöfen aus der Anfangszeit sind allerdings nur sehr begrenzt mit den heutigen vergleichbar (Interstahl o. J.b.).

Nachdem die ersten Hochöfen in Betrieb gingen, blieb die Kohlenstoffreduzierung des Roheisens eine Herausforderung. Dies gelang erstmals ebenfalls im 14. Jahrhundert, indem man in das flüssige Eisen Luft einblies. Dieser Vorgang, Frischen genannt, oxidiert die Begleitelemente im Eisenerz (chemie.de o. J.). Nach dem Schmieden bleibt sogenanntes Schmiedeeisen mit nur geringen Anteilen an Verunreinigungen übrig (Interstahl o. J.b.).

Koks ist ein fester, kohlenstoffreicher Brennstoff, der im Hochofenprozess sowohl als Energieträger als auch als Reduktionsmittel fungiert. Er liefert die nötige Wärme und hilft, den im Eisenerz enthaltenen Sauerstoff zu reduzieren, sodass Roheisen entsteht. Hergestellt wird Koks durch die Verkokung von Steinkohle: Dabei wird spezielle Kokskohle in geschlossenen Öfen ohne Luftzufuhr auf etwa 1.000 bis 1.200 °C erhitzt. Flüchtige Bestandteile entweichen, und es bleibt ein poröses, festes Material zurück, das fast vollständig aus Kohlenstoff besteht. Durch seine hohe Festigkeit und Gasdurchlässigkeit ist Koks ideal für den Einsatz im Hochofen geeignet.

Mit ihrer zunehmenden Größe der Anlagen prägte sich der Begriff „Hochofen“. Bis in das frühe 18. Jahrhundert nutzte man Holzkohle als Brennstoff. Anders als das zuvor im festen Zustand erzeugte Eisen war das erstarrte Roheisen aufgrund seines hohen Kohlenstoffgehalts jedoch ohne Weiterverarbeitung nicht schmiedbar.

Der Einsatz von Koks im Hochofen durch Abraham Darby bildete eine entscheidende Grundlage für das spätere Puddelverfahren. Da Koks im Vergleich zu Holzkohle höhere

Temperaturen ermöglicht und in größeren Mengen verfügbar war, konnte Eisen in deutlich größeren Mengen und mit gleichbleibender Qualität hergestellt werden.

Dieses Koks-Roheisen diente als Ausgangsmaterial für das von Henry Cort entwickelte Puddelverfahren (1784). Dort wurde das flüssige Roheisen in einem halboffenen Ofen unter Einwirkung heißer Verbrennungsluft ständig bewegt, um den Kohlenstoffgehalt zu verringern und schmiedbares Eisen zu erzeugen. Ohne den vorhergehenden Einsatz von Koks in der Hochofentechnik wäre die kontinuierliche Produktion des für das Puddelverfahren notwendigen Roheisens in dieser Größenordnung nicht möglich gewesen. (Interstahl o. J.b). Die Entwicklung spielte sich hauptsächlich in England ab. Erst 1819 trat mit Friedrich Harkort in Wetter (Ruhr) einer der ersten Stahlproduzenten in Deutschland auf den Plan.

Der Schotte James Beaumont Neilson führte 1828 eine entscheidende Verbesserung des Hochofens ein. Statt kalter Luft wurde jetzt heiße Luft eingeblasen, dies führte zu einer deutlichen Senkung des Koksverbrauchs. Somit war die Roheisenproduktion kein limitierender Faktor mehr. Das Problem lag hauptsächlich im Vorgang des Frischens, der durch den großen Aufwand nur eine geringe Produktion erlaubte (ERIH o. J.).

Bessemer und Siemens-Martin revolutionieren die Stahlproduktion

Die sogenannte Bessemer-Birne wurde von Henry Bessemer im Jahr 1855 entwickelt. Der Name stammt von der Birnenform des Ofens, der innen mit Silizium ausgekleidet ist. Dieses Verfahren ermöglichte, dass die Arbeiter das glühende Eisen nicht mehr von Hand umrühren mussten, da nun Pressluft für das Frischen verwendet wurde. Die Bessemer Birne erreichte so deutlich höhere

Temperaturen und ermöglichte einen nahezu kohlenstofffreien Stahl. Das Bessemer Verfahren (siehe Abb.5) hatte den Nachteil, dass nur seltene, phosphorarme Eisenerze verwendet werden konnten. Deshalb führte Sidney Gilchrist Thomas 1877 in England das Thomas Verfahren ein. Der Ofen wurde mit Wasserglas und Kalk ausgekleidet und war somit in der Lage den Phosphor zu binden (ERIH o. J.).

Schrott mit einzubringen. Die hohen Temperaturen ermöglichten eine hohe Qualität des Stahls.

Wilhelm Siemens gelang 1879 ein weiterer Durchbruch. Er entwickelte den Elektroofen, der auf einfache Weise extrem hohe Temperaturen erzeugen konnte. Strom war allerdings zu der Zeit noch sehr teuer und damit wurde der Elektroofen zunächst nur für hoch belastbare Stähle eingesetzt (Interstahl o. J.a).

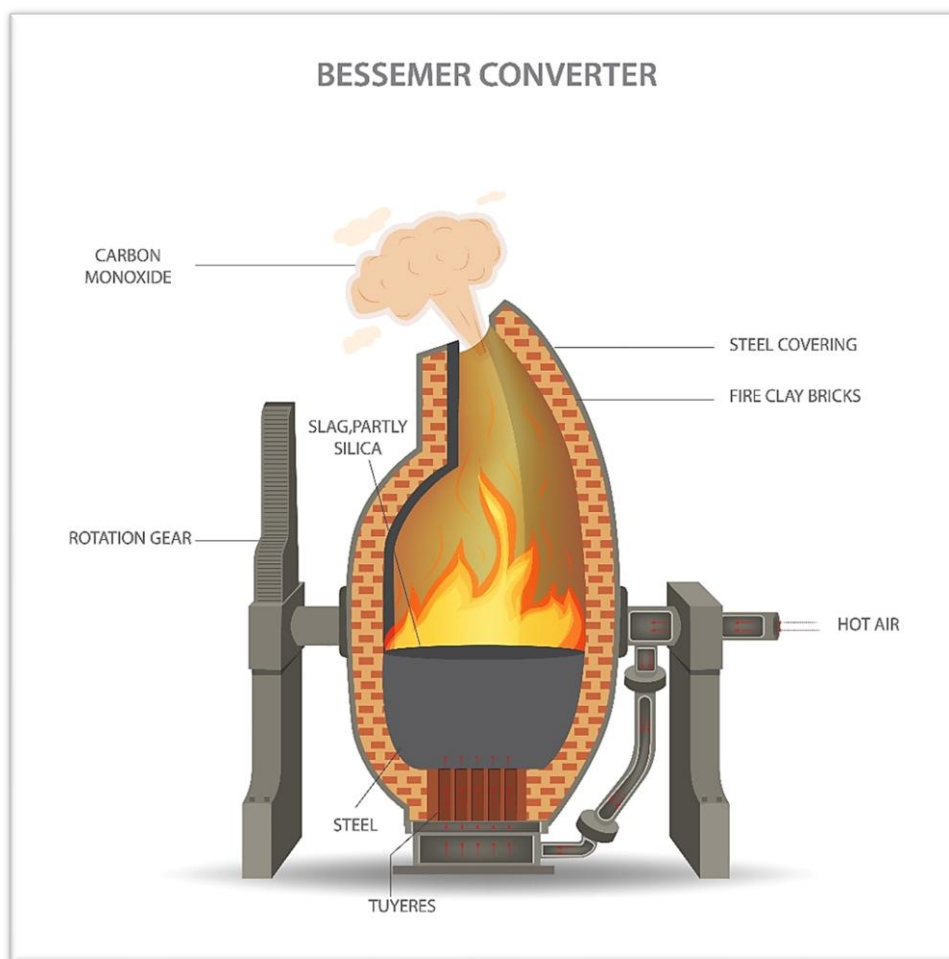


Abbildung 5: Bessemer-Birne im Querschnitt, Urheber: [Nandalal](#) – stock.adobe.com

1856 konnten die Gebrüder Friedrich und Wilhelm Siemens das Problem der Erzeugung von sehr hohen Temperaturen lösen. Dabei wurde die Wärme der Abgase genutzt, um die Verbrennungsluft zusätzlich aufzuheizen. Dadurch verringerte sich der Brennstoffverbrauch und es war möglich, auch

3.

3.1

Vorstufen der Hochofenroute: Sinteranlage und Kokerei

Eine zentrale Rolle spielen dabei die Sinteranlage, die Kokerei sowie der Löschurm. Die Prozesse in diesen Anlagen sind ein wichtiger Vorbereitungsprozess, um die Effizienz und gleichmäßige Beschickung des Hochofens zu gewährleisten, so dass qualitativ hochwertiges Roheisen produziert wird. Die dafür benötigten Rohstoffe wie Eisenerz und Koks werden meist per Schiff an den Hafen oder mit Zügen angeliefert. Am Beispiel von Dillinger erfolgt der Transport aus Australien. Dementsprechend müssen große Flächen für die Lagerung vorgehalten werden.

Die Hochofenroute

Die klassische Hochofenroute (siehe Abb. 6), über die ein Großteil des Stahls weltweit erzeugt wird, benötigt eine präzise aufbereitete Rohstoffbasis. Bevor Erz und Brennstoff in den Hochofen zugeführt werden können, müssen sie in speziellen Anlagen entsprechend aufbereitet werden.

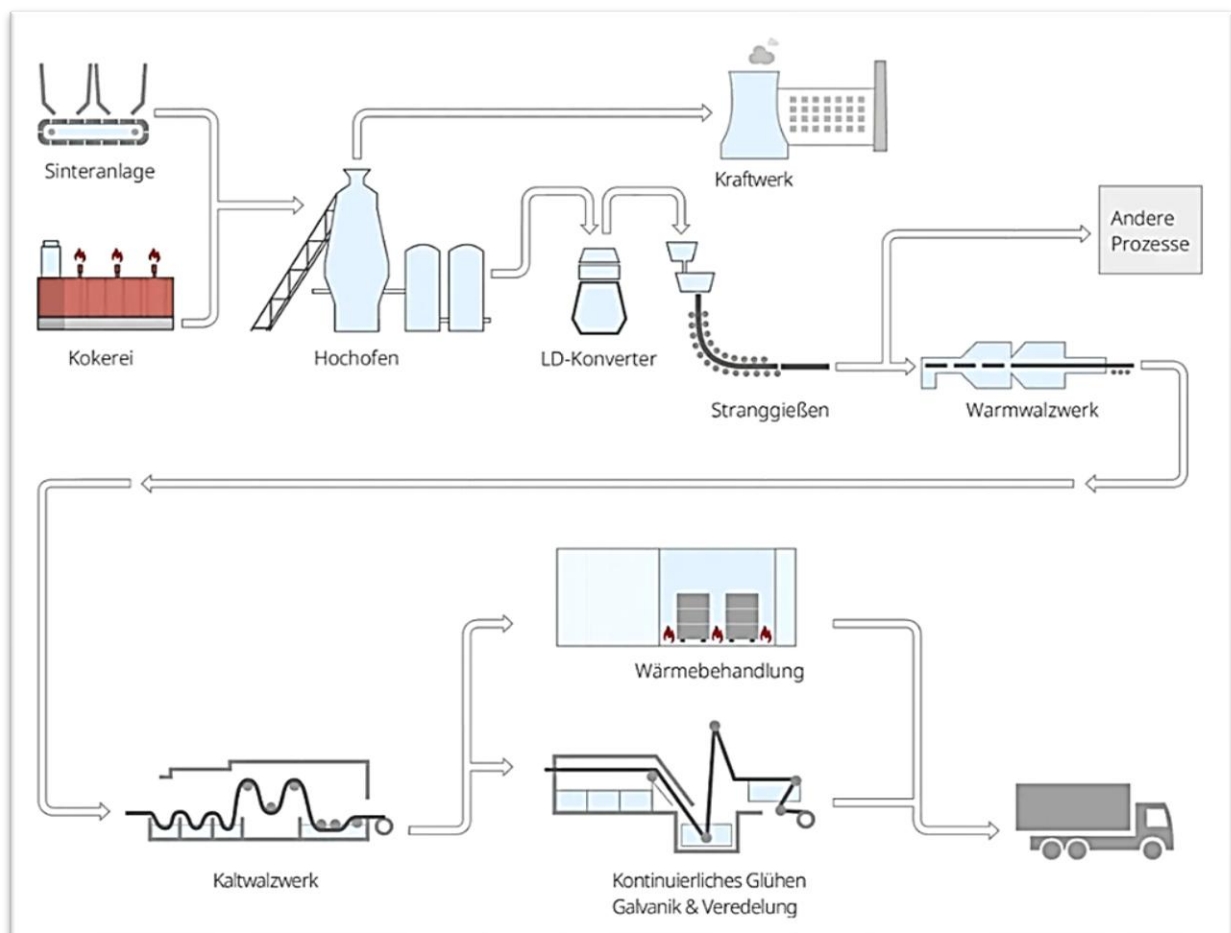


Abbildung 6: Hochofenroute (Koks), Quelle: Dourag Group o.J.

Das Eisenerz und der Koks werden getrennt voneinander gelagert, bis sie zum Beschießen des Hochofens benötigt werden.

Die Sinteranlage

Eisenerze liegen nach dem Abbau meist in feiner, staubiger Form vor und sind so zur Roheisenproduktion im Hochofen ungeeignet. In der Sinteranlage werden Eisenerze und andere Rohstoffe wie Koks und Zuschläge zur Bestückung des Hochofens aufbereitet. Dabei verschmelzen die einzelnen Körner teilweise miteinander und bilden ein poröses, festes Gefüge, den sogenannten Sinterkuchen. Nach dem Abkühlen wird dieser gebrochen und in gleichmäßige Stücke in eine Größe von etwa 10 bis 50 Millimeter gesiebt. Der so gewonnene Sinter stellt heute den Hauptanteil der Hochofenbeschickung dar. Er verbessert die Gasdurchlässigkeit und reduziert den Koksverbrauch, da bereits chemische Vorreaktionen im Sinterprozess ablaufen (Hegemann/Guder 2019; ERIH o. J.; EnArgus o. J.).

Die Kokerei

Eine Kokerei besteht aus einer Vielzahl speziell konstruierter Öfen, in denen Steinkohle unter Luftabschluss erhitzt wird. Den Bereich der Anlage, in dem sich die Koksöfen befinden, bezeichnet man als die sogenannte *schwarze Seite*. Die einzelnen Ofenkammern sind hoch und lang, aber sehr schmal gebaut – typischerweise etwa 6 bis 7 Meter hoch, 15 Meter lang und weniger als einen halben Meter breit. Mehrere Dutzend dieser Kammern, meist 35 bis 40 Stück, werden zu einer sogenannten Batterie zusammengefasst. Die gelieferte Feinkohle wird zunächst in Bunkern zwischengelagert und anschließend in der Mischerei so aufbereitet, dass die gewünschte Zusammensetzung ent-

steht. Über Förderbänder gelangt das Material weiter zu den Koksöfentürmen, von wo aus die Koksöfen beschickt werden. Dort findet bei Temperaturen von rund 1.000 bis 1.200 °C die eigentliche Verkokung statt. Dabei entweichen die flüchtigen Bestandteile der Kohle, und zurück bleibt ein fester, hochporöser Kohlenstoffkörper – der sogenannte Hochofenkoks. Dieser Koks übernimmt im späteren Hochofenprozess gleich mehrere zentrale Aufgaben: Er liefert die notwendige Wärmeenergie, dient als Reduktionsmittel, indem Kohlenstoff und Kohlenmonoxid die Eisenoxide zu metallischem Eisen umwandeln, und bildet zugleich ein stabiles Gerüst innerhalb der Beschickung, das für die notwendige Gasdurchlässigkeit sorgt (koks-gas-teer.de o. J.a).

Die sogenannte „weiße Seite“ einer Kokerei umfasst die Gasreinigungsanlagen. Hier wird das in den Koksöfen entstehende Rohgas von unerwünschten Bestandteilen befreit und aufbereitet. Ziel ist es, das Gas entweder innerhalb des Werkes als Energieträger zu nutzen oder in öffentliche Netze einspeisen zu können. Die Bezeichnung weiße Seite spielt darauf an, dass das Gas nach diesem Prozess frei von Ruß und sichtbaren Verunreinigungen ist. Erst durch diese Behandlung wird aus dem Rohgas ein Reingas, das sauber und verwertbar ist. Neben der Gasaufbereitung werden auch andere Nebenprodukte der Verkokung genutzt. Dazu zählen Koksöfengas selbst, Teer, Ammoniak oder Rohbenzol, die in modernen Anlagen nicht als Abfallstoffe, sondern als wertvolle Rohstoffe für die chemische Industrie oder als zusätzliche Energieträger dienen. Damit fungiert die Kokerei nicht nur als Lieferant von Koks für den Hochofen, sondern zugleich als eine Art chemische Fabrik (koks-gas-teer.de o. J.b; ArcelorMittal Germany o. J.).

3.2

Der Hochofenprozess

Das Hochofenverfahren gilt als klassisches Produktionsprinzip zur Gewinnung von Roheisen, das wiederum die Grundlage für die Stahlerzeugung bildet. Zum Einsatz kommen dabei große, vertikal aufgebaute Schachtöfen, in denen Eisenerz zusammen mit Koks und verschiedenen Zuschlägen unter sehr hohen Temperaturen verarbeitet werden. In diesem Reaktionsraum findet die Reduktion des Erzes statt, wobei das gewünschte Roheisen entsteht. Gleichzeitig bilden sich Nebenprodukte wie Schlacke und das sogenannte Gichtgas.

Damit ein Hochofen über viele Jahre – typischerweise zehn bis zwanzig – ohne Unterbrechung betrieben werden kann, ist er Teil einer umfangreichen Anlagentechnik. Neben dem Ofenschacht selbst gehören dazu Vorratsbunker für die Rohstoffe und Fördersysteme, die eine gleichmäßige Beschickung über den Gichtverschluss sicherstellen. Die für die Verbrennungs- und Reduktionsprozesse notwendige Heißluft wird in Winderhitzern vorgewärmt und über eine Ringleitung sowie zahlreiche Düsen in den Ofen eingeblasen. Der Innenraum des Hochofens ist mit feuerfestem Material ausgekleidet, während ein äußeres Kühlsystem für Temperaturstabilität sorgt. An den Ofen schließt sich eine speziell eingerichtete Abstich- oder Gießhalle an. Dort wird das flüssige Roheisen bei regelmäßigen Abstichen über Rinnen in Pfannen oder Torpedowagen geleitet, die für den Transport zur Weiterverarbeitung im Stahlwerk vorgesehen sind. Der gesamte Ablauf ist als kontinuierlicher Prozess angelegt, der in mehreren Stufen abläuft und eine gleichmäßige Produktion großer Mengen Roheisen ermöglicht (chemie-schule.de o.

J.; Hegemann/Guder 2019; tec-sience 2018; Interstahl o. J.a).

Beschickung des Hochofens

Das Eisenerz, der Koks und die Zuschlagstoffe (z.B. Kalkstein) werden von oben in den Hochofen eingebracht. Diese Rohstoffe fallen schichtweise durch den Schacht des Hochofens. Wichtige Rohstoffe:

- ▶ Eisenerz ist wie oben beschrieben die primäre Quelle von Eisen. Es wird in Form von Feinerz, Pellets oder Sinter in den Ofen eingebracht.
- ▶ Koks, ein kohlenstoffreicher Brennstoff, der aus der Verkohlung von Kohle gewonnen wird, dient sowohl als Brennstoff als auch als Reduktionsmittel.

Zuschlagstoffe wie Kalkstein oder Dolomit werden hinzugefügt, um die Verunreinigungen im Eisenerz zu binden und eine flüssige Schlacke zu erzeugen. Mit der Zugabe der Zuschlagstoffe werden Verunreinigungen wie Silikate im Eisenerz gebunden und eine flüssige Schlacke gebildet, die später abgetrennt wird (HSM Stahl 2019; JFE Steel Corporation 2022; chemie.de o. J.).

Vorwärmung und Reduktion der Rohstoffe

- ▶ Von unten wird hoch erhitze Luft (900°C bis 1.200 °C), der sogenannte „Wind“, durch Blasdüsen in den Hochofen eingeblasen. Diese heiße Luft strömt durch den Hochofen nach oben und erhitzt die fallenden Rohstoffe. Der Koks wird an der Basis des Hochofens verbrannt, was extrem hohe Temperaturen erzeugt (bis zu 2.000 °C). Dabei wird zunächst CO₂ gebildet, das sich anschließend durch Reaktion mit weiterem Kohlenstoff zu CO reduziert. Dieses Kohlenmonoxid reduziert schließlich das

Eisenoxid zu Eisen. (HSM Stahl 2019; JFE Steel Corporation 2022; chemie.de o. J.).

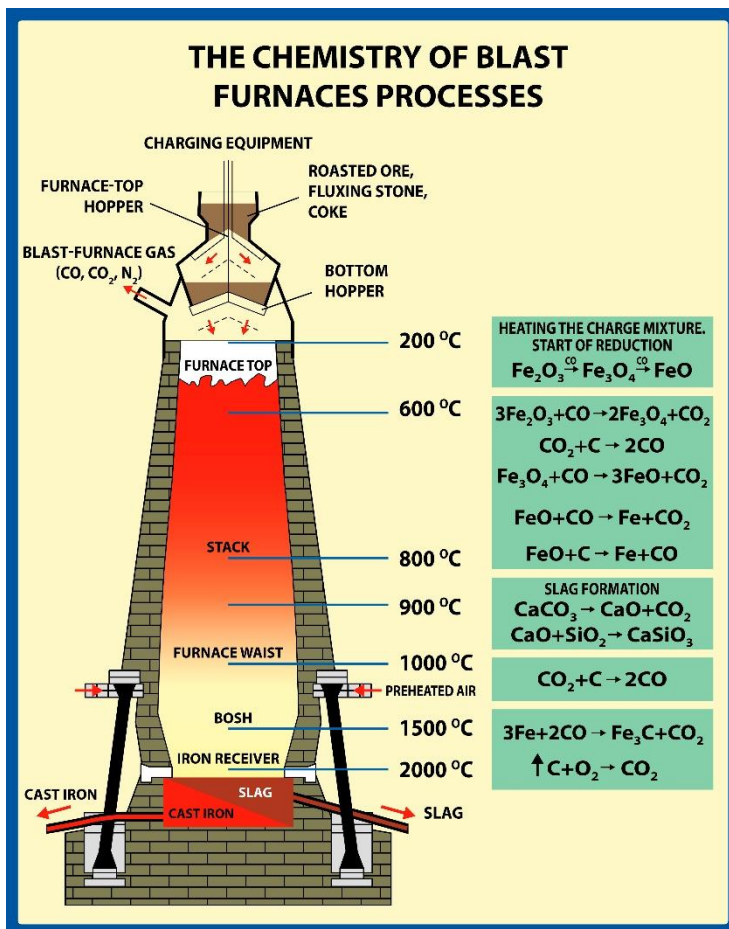


Abbildung 7: Prozesse im Hochofen, Urheber: Stanislav - stock.adobe.com

Reduktion des Eisenerzes

- Chemische Reduktion: Während die fallenden Eisenerzpartikel durch den heißen Hochofen wandern, beginnen sie zu reagieren. Die Reduktion des Eisenerzes erfolgt durch das Kohlenmonoxid (CO), das den Sauerstoff aus dem Eisenerz entfernt. Dabei wird das Eisen in metallischer Form freigesetzt, und Kohlendioxid wird als Nebenprodukt gebildet.
- Direkte und indirekte Reduktion - der Reduktionsprozess kann auf zwei Arten ablaufen (HSM Stahl 2019; JFE Steel Corporation 2022; chemie.de o. J.):

... Bei der indirekten Reduktion reagiert das Eisenoxid nicht direkt mit dem festen Kohlenstoff des Kokes, sondern mit dem im Hochofen entstehenden Kohlenmonoxid (CO). Dieser Prozess findet vor allem in den oberen, vergleichsweise kühlen Zonen des Hochofens statt und verläuft schrittweise: Aus Eisenoxid (Fe₂O₃) entstehen zunächst Magnetit (Fe₃O₄) und Eisen(II)-oxid (FeO), bevor schließlich metallisches Eisen (Fe) gebildet wird. Das Kohlenmonoxid dient dabei als Reduktionsmittel und wird selbst aus der Reaktion von Kohlendioxid mit Kohlenstoff gebildet.

... In den tieferen, heißeren Bereichen des Hochofens erfolgt die direkte Reduktion, bei der das Eisenoxid unmittelbar mit festem Kohlenstoff reagiert. Dabei entsteht ebenfalls metallisches Eisen, allerdings unter höherem Energieaufwand, da der feste Kohlenstoff weniger reaktionsfreudig ist als Kohlenmonoxid. In der Praxis laufen beide Prozesse nebeneinander ab: Während in den oberen Zonen die indirekte Reduktion überwiegt, setzt sich in den unteren Zonen zunehmend die direkte Reduktion durch. Gemeinsam führen sie dazu, dass das Eisenerz vollständig zu Roheisen reduziert wird.

- Im Hochofen entsteht Kohlendioxid (CO₂) auf zwei Wegen: Zum einen als Nebenprodukt der indirekten Reduktion, bei der das im Erz enthaltene Eisenoxid durch Kohlenmonoxid zu Eisen reduziert wird, und zum anderen bei der Verbrennung des Kokes im unteren Teil des Ofens. Dabei reagiert der Kohlenstoff des Kokes mit dem zugeführten Sauer-

stoff zu Kohlendioxid. Ein Teil dieses Gases reagiert anschließend mit weiterem Kohlenstoff zu Kohlenmonoxid (Boudouard-Reaktion) und sorgt so für den kontinuierlichen Kreislauf der Reduktionsgase im Hochofen.

- ▶ Neben dem Eisen entstehen während des Prozesses auch Schlackenbestandteile. Dabei werden Begleitstoffe des Erzes, wie Silikate oder Aluminiumverbindungen, durch die Zugabe von Kalkstein gebunden. Der Kalkstein zerfällt bei hohen Temperaturen und reagiert mit diesen Verunreinigungen zu einer flüssigen Schlacke, die sich über dem Roheisen absetzt. Sie wirkt als Schutzschicht und ermöglicht es, das Roheisen von den unerwünschten Stoffen zu trennen.
- ▶ Das geschmolzene, reduzierte Eisen sammelt sich am Boden des Hochofens. Dieses Roheisen enthält einen hohen Kohlenstoffanteil (etwa 4-5 %), der es spröde macht. Es wird später in einem Konverter weiterverarbeitet, um Stahl herzustellen.
- ▶ Die nichtmetallischen Verunreinigungen im Erz verbinden sich mit den Zuschlagstoffen (z. B. Kalkstein) zu einer flüssigen Schlacke, die leichter ist als das Roheisen und sich oberhalb des flüssigen Eisens sammelt. Sie wird regelmäßig abgezogen und in verschiedenen Industrien (z.B. im Straßenbau) weiterverwendet (HSM Stahl 2019; JFE Steel Corporation 2022; chemie.de o. J.).

Abzapfen von Roheisen und Schlacke

- ▶ Roheisenabstich: Das Roheisen wird regelmäßig durch spezielle Öffnungen (Abstichlöcher) aus dem Hochofen abgelassen. Es fließt in eine Gießpfanne, von der es zur Weiterverarbeitung in einem Stahlwerk oder einer Gießerei gebracht wird.

- ▶ Schlackeabstich: Die Schlacke wird ebenfalls regelmäßig durch ein separates Abstichloch abgezogen und in speziellen Behältern gesammelt (HSM Stahl 2019; JFE Steel Corporation 2022; chemie.de o. J.).

Nutzung des Gichtgases

- ▶ Während des Hochofenprozesses entsteht ein heißes Abgas, das sogenannte Gichtgas. Es besteht hauptsächlich aus Stickstoff, Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO₂).
- ▶ Dieses Gas hat einen hohen Heizwert und wird oft zur Energiegewinnung in der Hochofenanlage selbst oder in benachbarten Stahlwerken verwendet (HSM Stahl 2019; JFE Steel Corporation 2022; chemie.de o. J.).

Hochöfen arbeiten im Dauerbetrieb

Das Anfahren und das Abschalten eines Hochofens ist mit großem Aufwand verbunden, weshalb diese Anlagen üblicherweise im kontinuierlichen Betrieb laufen. Etwa alle zehn bis fünfzehn Minuten wird von oben eine kleinere Menge Einsatzmaterial nachgefüllt. Die entstehende Schlacke lässt sich ungefähr alle zwei Stunden abziehen. Mehrmals am Tag – in der Regel fünfmal – wird der Ofen „geöffnet“, um das Roheisen abzulassen. Dabei wird ein Verschluss aus Ton im unteren Bereich geöffnet, sodass das flüssige Eisen durch eine mit Ton ausgekleidete Rinne in spezielle Transportgefäße gelangt. Diese sogenannten Pfannen bestehen aus feuerfestem Material, sind häufig auf Eisenbahnwaggonen montiert und können mehr als 100 Tonnen flüssiges Eisen aufnehmen. In diesem Zustand lässt sich das Metall für eine gewisse Zeit speichern. Die Schlacke, die gemeinsam mit dem Eisen austritt, wird vorher abgeschieden, damit sie

nicht in den Behälter gelangt. Da Hochöfen meist direkt an ein Stahlwerk angebunden sind, kann das Roheisen unmittelbar in flüssiger Form dorthin transportiert werden. In manchen Fällen wird es jedoch zunächst zu massiven Blöcken erstarrt und erst anschließend ins Stahlwerk gebracht. (Interstahl o. J.b).

3.3

Vom Roheisen zum Stahlprodukt: Konverter, Stranggussanlage und Walzwerk

Der Konverterprozess



Abbildung 8: Konvertergefäß, Quelle: Saarstahl o.J.

Nachdem im Hochofen flüssiges Roheisen erzeugt wurde, beginnt der eigentliche Prozess der Stahlherstellung. Das Roheisen enthält mit etwa vier bis fünf Prozent Kohlenstoff sowie weiteren Begleitelementen wie Silizium, Mangan, Schwefel und Phosphor deutlich mehr Verunreinigungen, als für technischen Stahl zulässig sind. Daher wird es im Stahlwerk, meist in einem LD-Konverter (Linz-Donawitz-Verfahren), zu Rohstahl veredelt. Der Konverter ist ein birnenförmiges, kippbares Gefäß mit einem Fassungs-

vermögen von bis zu mehreren Hundert Tonnen (siehe Abb. 8). In dieses Gefäß wird das flüssige Roheisen eingefüllt, häufig zusammen mit einer gewissen Menge Schrott, um Energie zu sparen und den Kohlenstoffgehalt zu regulieren. Von oben wird anschließend hochreiner Sauerstoff mit sehr hohem Druck eingeblasen. Dieser Sauerstoff oxidiert die im Roheisen enthaltenen Begleitelemente. Kohlenstoff entweicht als Kohlenmonoxid und Kohlendioxid, Silizium, Mangan und Phosphor gehen in die Schlacke über. Innerhalb von nur zwanzig Minuten sinkt der Kohlenstoffgehalt auf den gewünschten Bereich von etwa 0,02 bis 1 Prozent und es entsteht Rohstahl. In der nachfolgenden Sekundärmetallurgie wird dieser Stahl weiterbehandelt. Dort erfolgen die Entschwefelung, die Vakuumentgasung zur Entfernung gelöster Gase und die gezielte Legierung mit Elementen wie Chrom, Nickel oder Molybdän, um spezielle Stahleigenschaften zu generieren (HSM Stahl 2019; ingenieurse.de o. J.; Schwingenschrot 2010).

Die Stranggussanlage



Abbildung 9: Stranggussanlage, Quelle: Saarstahl o.J.

Um den flüssigen Stahl weiterverarbeiten zu können, muss er in eine feste Form überführt werden. Dies geschieht heute fast ausschließlich im Stranggussverfahren (siehe Abb. 9). Hierbei wird der Stahl zunächst in

durch Schneidbrenner oder Sägen die typischen Halbzeuge – breite und dicke Brammen für Bleche, längliche Knüppel für Drähte oder Stäbe sowie massive Blöcke für Schienen und Profile. Der kontinuierliche Strangguss hat den früher üblichen Blockguss fast vollständig verdrängt, da er eine höhere Produktivität, geringere Materialverluste und eine gleichmäßigere Gefügestruktur bietet (Informationsblätter Stahl o. J.; Dresler 2020).

Das Walzwerk

Die im Strangguss erzeugten Halbzeuge bilden das Ausgangsmaterial für das Walzwerk. Dort werden sie zunächst in Erwärmungsöfen auf etwa 1200 Grad Celsius er-



Abbildung 10: Walzwerk, Quelle: Dillinger o.J.

eine Verteilerpfanne (Tundish) geleitet, von der er gleichmäßig in wassergekühlte Kupferkokillen fließt. An den gekühlten Kokillwänden erstarrt sofort eine feste Schale, während der Kern des Strangs noch flüssig bleibt. Der Strang wird kontinuierlich nach unten gezogen und durch intensive Sekundärkühlung mit Wasser schließlich vollständig erstarrt. Am unteren Ende entstehen

hitzt, um sie verformbar zu machen. Anschließend laufen sie durch mehrere Walzgerüste, in denen sie schrittweise dünner und länger ausgewalzt werden (siehe Abb. 10). Beim Warmwalzen entstehen beispielsweise Bleche, Schienen oder Träger. Für Anwendungen, die eine besonders hohe Oberflächenqualität oder eine exakte Genauigkeit

erfordern, folgt oft ein Kaltwalzprozess. Dabei wird das bereits warmgewalzte Material bei Raumtemperatur weiter reduziert, wodurch die Festigkeit steigt und die Oberfläche verfeinert wird. Auf diese Weise entstehen dünne Feibleche, wie sie beispielsweise in der Automobilindustrie, für Haushaltsgeräte oder im Verpackungssektor benötigt werden (Frauenhofer ISI 2023; VDEh 2025a; IREES 2020).

Vom Hochofen über den Konverter und die Stranggussanlage bis zum Walzwerk spannt sich damit eine komplexe Prozesskette, welche das Kernstück der modernen Stahlproduktion bildet. Jeder einzelne Schritt – die chemische Raffination im Konverter, die kontrollierte Erstarrung im Strangguss und die mechanische Umformung im Walzwerk – ist unverzichtbar, um die Vielfalt und Qualität der heutigen Stahlprodukte zu ermöglichen. Jeder Prozess ist dabei präzise aufeinander abgestimmt und unverzichtbar für die heute verfügbare Bandbreite an Stahlprodukten.

4.

Direktreduktionsanlage (DRI) und Elektrolichtbogenofen (EAF)

Direktreduktionsanlagen (DRI-Anlagen) existieren bereits seit den 1960er Jahren. Das Midrex-Verfahren kommt auch bei der Dillinger Hütte zum Einsatz, es ist weltweit am häufigsten verbreitet, wurde 1969/1970 erstmals industriell eingesetzt und prägt seither die globale DRI-Produktion. Bis heute wird im industriellen Betrieb überwiegend Erdgas eingesetzt – hydrogenreiche Anteile waren jedoch von Anfang an dabei (VDEH 2025a; DER SPIEGEL 1976).



Abbildung 10: DRI-Anlage bei Dillinger; Quelle: Dillinger

Die vollständige Reduktion von Eisenerz allein mit reinem Wasserstoff (statt Erdgas) ist zwar schon länger bekannt, aber technisch erst seit kurzem im großindustriellen Maßstab möglich (Vattenfall 2021). Das Pionierprojekt HYBRIT aus Schweden konnte 2021 erstmals vollständig wasserstoffreduzierten Eisenschwamm im kontinuierlichen Betrieb herstellen. Die notwendige Bereitstellung von grünem Wasserstoff (über Elektrolyse mit erneuerbarem Strom) ist durch die jüngsten Fortschritte in der Wasserstoffelektrolyse und erneuerbaren Energien erst in den letzten Jahren für die Stahlindustrie relevant geworden (Vattenfall 2021).

4.1

Schritte im DRI-Prozess: Das Grundprinzip der Direktreduktion

Die Direktreduktion (DRI) ist ein Verfahren, bei dem Sauerstoff aus dem Eisenerz entfernt wird, um festes Eisen zu gewinnen (siehe Abb. 10). Dies geschieht bei niedrigeren Temperaturen als im traditionellen Hochofenprozess und ohne die Verflüssigung des Eisens. In klassischen Anlagen wird Erdgas verwendet, das durch Dampfreformierung aufbereitet wird. Dabei wird Methan in Kohlenmonoxid und Wasserstoff aufgespalten, die als Reduktionsgase genutzt werden (Midrex 2018; VDI Nachrichten 2022; SZAG o.J.).

- "Direkt": Der Prozess im Schachtofen wandelt das Eisenerz direkt in Eisen um, ohne dass das Eisen durch Verflüssigung wie im Hochofenprozess entsteht.

- "Reduktion": Der Sauerstoff im Eisenerz (meist Eisenoxid) wird durch ein Reduktionsmittel entfernt, wodurch reines Eisen übrigbleibt.

Der Schachtofen ist ein vertikaler Reaktor und zählt zu den Ofentypen, die am häufigsten bei der Direktreduktion eingesetzt werden. Das Eisenerz wird durch das Einblasen des Reduktionsgases erhitzt. Das Reduktionsgas strömt von unten nach oben durch das Eisenerz, entfernt den Sauerstoff und hinterlässt den so genannten Eisenschwamm. Dabei erfolgt zunächst die Eisenerz- und Reduktionsmittelzufuhr. Als Rohstoff wird hochgradiges Eisenerz in Form von Pellets oder Klumpen verwendet. Das Eisenerz liegt in oxidiert Form vor (meist Hämatit oder Magnetit). Um den Sauerstoff aus dem Eisenerz zu entfernen, wird ein Reduktionsmittel benötigt. Dies kann entweder Erdgas oder Wasserstoff sein. Das im Erdgas enthaltene Methan reagiert bei hohen Temperaturen mit dem Sauerstoff im Eisenerz, was Kohlenstoffdioxid freisetzt. Im Gegensatz dazu entsteht bei der Verwendung von Wasserstoff als Reduktionsmittel nur Wasserdampf (H_2O) als Nebenprodukt, was den Prozess nahezu emissionsfrei macht (IREES 2020; VDI Nachrichten 2022). Der Prozess der Reduktion selbst findet bei etwa 800 bis 1.100°C statt, was deutlich unter den Temperaturen eines Hochofens liegt, bei dem das Eisenerz verflüssigt wird (VDI Nachrichten 2022).

Die Bildung von Eisenschwamm – das so genannte Direct Reduced Iron (DRI) – ist der Hauptaustauschstoff des Prozesses. Dabei handelt es sich um eine poröse, feste Eisenmasse. Durch das Entfernen des Sauerstoffs bleibt reines oder nahezu reines Eisen zurück. Es hat eine schwammartige Struktur, daher der Name "Eisenschwamm". Der Eisenschwamm wird entweder direkt in Elektro-Lichtbogenöfen (EAF) geschmolzen,

um Stahl zu produzieren, oder er kann in Form von Hot Briquetted Iron (HBI) weiterverarbeitet werden, einer komprimierten Form von DRI, die leichter zu transportieren ist. Da der DRI einen geringeren Kohlenstoffgehalt aufweist, trägt dies zu einer besseren Qualität des Endprodukts bei (IREES 2020; VDI Nachrichten 2022).

Die Direktreduktionsanlage ist eine der vielversprechendsten Technologien zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie. Mit fossilem Erdgas erzeugt sie zwar weniger CO_2 -Emissionen als traditionelle Verfahren, aber die Verwendung von grünem Wasserstoff in Verbindung mit erneuerbaren Energien ermöglicht eine nahezu emissionsfreie Stahlproduktion. Der Schlüssel zur breiten Anwendung dieser Technologie liegt in der Entwicklung kosteneffizienter Methoden zur Herstellung von grünem Wasserstoff (tkSE 2023).

Die Vorteile der Direktreduktion im Vergleich zur Hochofenroute sind vielfältig:

- Im Vergleich zum Hochofenprozess sind die Temperaturen niedriger, was den Energieverbrauch reduziert.
- Der Prozess verursacht weniger CO_2 -Emissionen, insbesondere, wenn Wasserstoff als Reduktionsmittel verwendet wird.
- In Kombination mit grünem Wasserstoff und erneuerbaren Energien kann DRI die Stahlproduktion nahezu emissionsfrei gestalten.

4.2

Der Elektrolightbogenofen (EAF)

Ein Elektrischer Lichtbogenofen (EAF) ist eine Anlage, die hauptsächlich zur Stahlerzeugung verwendet wird, indem Schrott oder direkt reduziertes Eisen (DRI) geschmolzen wird. Der zentrale Prozess basiert auf der Erzeugung eines Lichtbogens, der zwischen Elektroden und dem Schmelzgut erzeugt wird und so die nötige Hitze liefert, um das Metall zu schmelzen. Es gibt zwei mögliche Energiequellen für den EAF (R.T. Patterson Company o. J.; RWTH CD 2025; Kleimt et al 2012):

- Wird der EAF mit konventionellem Strom betrieben, der aus fossilen Brennstoffen stammt (z. B. Kohle- oder Gaskraftwerke), entstehen indirekt CO₂-Emissionen. Obwohl der Ofen selbst keine direkten Emissionen verursacht, hängt die Umweltbilanz von der Art der Stromerzeugung ab.
- Wenn der EAF mit „grünem“ Strom aus erneuerbaren Energiequellen (z. B. Wind, Solar, Wasserkraft) betrieben wird, entstehen keine CO₂-Emissionen. Der Prozess wird dann als emissionsfrei betrachtet, was zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie beiträgt.
- Es gibt verschiedene Arten von EAFs, die sich in ihrer Größe und ihrer spezifischen Nutzung unterscheiden:
- Mini-Mills sind kleinere Anlagen, die hauptsächlich Stahlschrott recyceln. Diese sind in der Regel kleiner als konventionelle Stahlwerke und spielen eine wichtige Rolle beim Recycling von Stahlschrott (UBA-AT 1998).
- EAFs für spezielle Stahllegierungen sind für die Herstellung hochwertiger Spezialstähle ausgelegt und verwenden DRI als Rohstoff, um die Reinheit des Stahls zu maximieren.

Funktionsprinzip eines Elektro-Lichtbogenofens (EAF)

Ein elektrischer Lichtbogenofen nutzt elektrische Energie, um ein hohes Maß an Hitze zu erzeugen, das zur Schmelzung von Eisen und Stahl erforderlich ist. Dies geschieht durch die Erzeugung eines elektrischen Lichtbogens zwischen Graphitelektroden und dem zu schmelzenden Material. Der Lichtbogen überträgt extrem hohe Temperaturen auf das Metall, was den Schmelzprozess ermöglicht. Ein EAF besteht aus einem großen, runden Gefäß, das mit feuerfestem Material ausgekleidet ist, um den intensiven Temperaturen von bis zu 3.500°C standzuhalten. Der Ofen wird hauptsächlich mit Schrott (Altmetall) oder direkt reduziertem Eisen (DRI) beschickt. Der Schrott ist in der Regel der Hauptbestandteil. DRI wird hinzugefügt, um die Stahlqualität zu verbessern. Der Ofen wird von oben geöffnet, und das Material wird mit großen Kransystemen oder Behältern in das Ofengefäß gefüllt. Der Transformator liefert die elektrische Energie, die notwendig ist, um den Lichtbogen zu erzeugen. Die Energie, die in den Lichtbogen fließt, wird durch das Absenken und Anheben der Elektroden gesteuert (Kleimt et al 2012; voestalpine AG 2023).

Ist der Ofen beladen, wird der Deckel geschlossen, und die Elektroden werden abgesenkt, bis sie das Metall berühren. Der elektrische Lichtbogen wird erzeugt, indem eine sehr hohe elektrische Spannung zwischen den Elektroden und dem Schrott angelegt wird. Sobald die Elektroden den Schrott berühren und dann leicht angehoben werden, springt der Lichtbogen über und erzeugt

eine extrem hohe Temperatur bis zu 3.500 °C. Der Lichtbogen fungiert als eine Art "elektrisches Feuer", welches das Metall schnell erhitzt und schmilzt. Dies geschieht innerhalb von Minuten. Durch das Erhitzen wird das Material verflüssigt und sinkt auf den Boden des Ofens. Um die Intensität des Lichtbogens zu steuern, werden während des Schmelzprozesses die Elektroden automatisch abgesenkt oder angehoben. Je näher die Elektroden am Material sind, desto intensiver ist die Hitze (siehe Abb.11). Die Steuerung des Lichtbogens ist entscheidend für die Effizienz des Schmelzprozesses. Die Elektrodensteuerung im Lichtbogenofen erfolgt heute überwiegend automatisch und digital, nicht manuell-analog durch das Perso-

Abstand zu Schäden an den Elektroden führen kann (Hegemann/Guder 2020; marketSTEEL 2024; Schliephake 2014; Schwingenschrot 2010).

Die hohen Temperaturen sorgen dafür, dass das Schrottmaterial oder DRI vollständig schmilzt. Da die Temperaturen weit über den Schmelzpunkt von Stahl hinausgehen, verbrennen gleichzeitig auch Verunreinigungen im Metall. Mit der Zugabe von Zuschlagstoffen (Legierungselemente z. B. Kohlenstoff, Mangan, Nickel, Chrom) während des Schmelzprozesses, erhält der Stahl die gewünschten Eigenschaften. Diese Legierungselemente verbessern die Härte, Flexibilität oder Korrosionsbeständigkeit des Stahls. Nichtmetallische Verunreinigungen

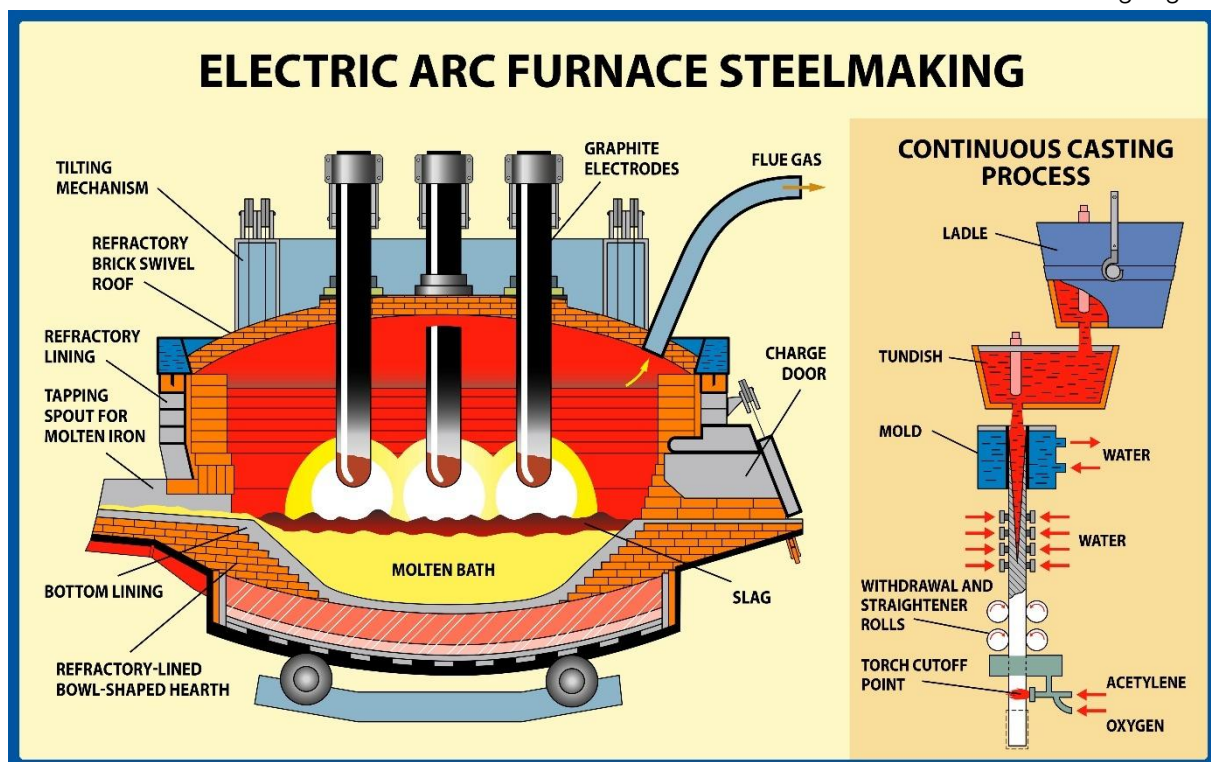


Abbildung 11: Querschnitt eines Elektrolichtbogenofens, Urheber: Stanislav – stock.adobe.com

nal in der Leitwarte – aber mit überwachender und eingreifender Rolle der Bediener:innen. Ein zu großer Abstand zwischen den Elektroden und dem Schmelzgut kann den Lichtbogen instabil machen, was Energieverluste zur Folge hat, während ein zu kleiner

im Schrott verbinden sich zu einer Schlacke, die oben auf der Schmelze schwimmt. Diese Schlacke wird regelmäßig abgezogen, um den Stahl zu reinigen. Nach dem Schmelzen wird der flüssige Stahl gereinigt und entgast, um Verunreinigungen wie Schwefel oder

Phosphor zu entfernen. Ist der Schmelzprozess abgeschlossen und hat der Stahl die gewünschte Temperatur und Zusammensetzung erreicht, wird er in eine Gießpfanne abgelassen.

Die Gießpfanne transportiert den flüssigen Stahl zur Weiterverarbeitung, beispielsweise zur Stranggussanlage, wo er in Form gegossen wird (Hegemann/Guder 2020; Rekersdrees et al 2014). Der Elektrolichtbogenofen (EAF) gilt als deutlich effizienter und flexibler als der traditionelle Hochofen. Da er vor allem mit recyceltem Stahlschrott arbeitet, benötigt er weniger Energie, da kein Eisenerz reduziert werden muss. Dies führt zu einem geringeren Verbrauch von Primärrohstoffen und reduziert den CO₂-Ausstoß erheblich. Zudem lässt sich der Ofen schnell hoch- und herunterfahren, was eine flexible Anpassung an Produktionsmengen ermöglicht. Dadurch eignet sich der EAF besonders für kleinere Chargen und die Herstellung von Spezial- oder Edelstählen. Wird der Elektrolichtbogenofen mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben, kann die Stahlproduktion nahezu emissionsfrei erfolgen.

Der EAF ist nicht in allen Fällen automatisch energieärmer. Wird anstelle von Schrott Eisenschwamm (Direct Reduced Iron, DRI) eingesetzt, kann der Energiebedarf deutlich steigen, da das Material erst reduziert und anschließend eingeschmolzen werden muss. Dennoch bleibt der Elektrolichtbogenofen im Vergleich zur klassischen Hochofen-Route aus Hochofen und Konverter insgesamt klimafreundlicher, flexibler und besser in nachhaltige Produktionskonzepte integrierbar. (Hegemann/Guder 2020; marketSTEEL 2024; Schleiphake 2014).

4.3

Transformation von der Hochofenroute zur DRI–EAF-Route: Wegfallende und neue Anlagen und Prozesse

Die Umstellung von der traditionellen Hochofenroute (BF–BOF) auf die Kombination aus Direktreduktionsanlagen (DRI) und Elektrolichtbogenöfen (EAF) bedeutet eine grundlegende Neustrukturierung der gesamten Produktionskette in der Stahlindustrie. Während die bisherige Route auf kohlenstoffintensive Prozesse aufbaut, die stark von Koks kohle abhängig sind, verschiebt die neue Produktionslogik den Schwerpunkt auf wasserstoff- und strombasierte Verfahren. Besonders gravierend ist der Wegfall der Kokereien. In ihnen wurde Steinkohle zu Koks veredelt, der als Reduktionsmittel, Energieträger und als stützende Säule des Hochofens unverzichtbar war. Mit dem Wechsel zur Direktreduktion entfällt diese Funktion vollständig, sodass Kokereien mitsamt ihrer aufwändigen Nebenproduktlogistik überflüssig werden (Lüngen/Schmöle 2022a). Gleiches gilt für die Sinteranlagen. Im Unterschied zu Hochofen benötigen Direktreduktionsaggregate hochqualitative Erz-Pellets mit hohem Eisengehalt und homogener Korngröße, die in spezialisierten Pelletieranlagen hergestellt werden (Midrex 2021).

Der zentrale Umbruch vollzieht sich am Hochofen selbst. Er war bislang das Herzstück der Eisen- und Stahlerzeugung. Hier wurden Erz, Zuschläge und Koks unter hohen Temperaturen zu flüssigem Roheisen reduziert. Mit der Direktreduktion wird dieser Prozess durch die Herstellung von Eisenschwamm (DRI) im Schachtofen ersetzt.

Hochöfen und die mit ihnen verbundenen Systeme wie Winderhitzer, Gichtgasreinigungen oder Anlagen zur Kohlenstaubeinblasung entfallen. Auch der Sauerstoffkonverter (BOF), in dem bisher aus dem Hochofenroheisen und Schrott Rohstahl erzeugt wurde, verliert seine Funktion. An seine Stelle tritt der Elektrolichtbogenofen, der die Verflüssigung von DRI und Schrott ausschließlich mit elektrischer Energie übernimmt (World Steel Association 2020) und zu einem neuen Kernaggregat der Stahlherzeugung wird. Er ersetzt nicht nur den Konverter, sondern erfordert auch eine andere Prozesslogik, da er kontinuierlich mit Schrott und DRI beschickt werden muss. Ergänzend sind Pfannenöfen und Vakuumanlagen für die Sekundärmetallurgie notwendig, um die geforderte Stahlqualität sicherzustellen (Lüngen/Schmöle 2022a; Lüngen/Schmöle 2022b).

Darüber hinaus werden neue Versorgungs- und Energiesysteme benötigt. Da wasserstoffbasierte Direktreduktion nur funktioniert, wenn ausreichend H_2 zur Verfügung steht, müssen Elektrolysekapazitäten, Speicher- und Verdichtungsanlagen sowie Pipelines aufgebaut werden. Parallel steigt der Strombedarf erheblich. Der EAF benötigt hohe Anschlussleistungen und erzeugt durch seine Betriebsspitzen Netzschwankungen (siehe Abb.12). Deshalb müssen moderne Netzstabilisierungsanlagen installiert werden, um eine sichere Versorgung zu gewährleisten. Auch die Abgas- und Entstaubungssysteme sowie die Schlackebehandlung werden angepasst, da die neue Prozessroute andere Stoffströme erzeugt als die Hochofenroute. Die Weiterverarbeitung – Stranggießanlagen, Walzwerke und Veredelungsstufen – bleibt im Wesentlichen bestehen.



Abbildung 12: Baufeld bei Saarstahl in Völklingen (Stand 2025), Quelle: SHS

Diese Aggregate müssen nur an die leicht veränderten Material- und Temperaturbedingungen angepasst werden. Entscheidend ist, dass die größten Veränderungen im „Upstream“ liegen, also in der Erzeugung von Rohstahl: Hier werden ganze Anlagenteile der traditionellen Route stillgelegt, während neue Aggregate und Infrastrukturen aufgebaut werden (Lüngen 2021; Lüngen/Schmöle 2022a).

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Der Übergang zur DRI–EAF-Route bedeutet das Ende von Kokerei, Sinteranlage, Hochofen und Sauerstoffkonverter. An ihre Stelle treten Direktreduktionsanlagen, Elektrolichtbogenöfen, Wasserstoff- und Strominfrastruktur sowie neue Entstaubungs- und Schlackebehandlungssysteme. Diese Verschiebung markiert nicht nur einen technologischen Wandel, sondern den Abschied von der kohlenstoffbasierten Stahlproduktion und den Einstieg in eine emissionsarme wasserstoff- und stromgetragene Stahlindustrie.

5.

Dekarbonisierung der Stahlindustrie: Herausforderungen, Pfadabhängigkeiten und organisatorische Umsetzung am Beispiel der Unternehmen Dillinger und Saarstahl

Die Dekarbonisierung der Stahlindustrie stellt eine der größten industriepolitischen und technologischen Transformationen der Gegenwart dar. Sie zwingt integrierte Hüttenstandorte, die bislang auf kohlebasierten Hochofenrouten basieren, zu einem tiefgreifenden Umbau ihrer Produktions-, Energie- und Organisationsstrukturen.

Am Beispiel von Dillinger und Saarstahl wird deutlich, dass diese Umstellung ein komplexes Zusammenspiel technischer Innovationen, neuer Energie- und Wasserstoffinfrastrukturen, logistisch-organisatorischer Neuausrichtungen, Kompetenzaufbau durch Weiterbildungsangebote und kultureller Anpassungen erfordert. Die folgenden Ausführungen zeigen, dass die Dekarbonisierung nicht allein durch den Einsatz neuer Technologien realisierbar ist, sondern vielmehr einen systemischen Umbau darstellt, der von

politisch-regulatorischen Rahmenbedingungen, Energiepreisen, gesellschaftlicher Akzeptanz und erheblichen Anpassungsleistungen der betrieblichen Akteur:innen gleichermaßen abhängig ist.

Die Dekarbonisierung ist weit mehr als ein Bauprojekt für die deutschen Stahlhersteller – sie markiert eine umfassende Umstrukturierung der gesamten Stahlindustrie. Technologisch geht es dabei nicht nur um die Errichtung neuer Direktreduktionsanlagen und den Bau von Elektrolichtbogen-Öfen. Damit verbindet sich die grundlegende Neugestaltung des Geschäftsmodells und eine tiefgreifende Neuordnung der gesamten Wertschöpfungskette – von der Rohstofflogistik über die Energiebereitstellung bis hin zur finanziellen Steuerung und Neugestaltung der Produktionsprozesse. Die Stahlindustrie steht damit vor ihrer bis dato größten Herausforderung – der Übergang von einer kohle- und koksbasierten Hochofenroute hin zu einer klimafreundlichen Produktion auf Basis von Direktreduktion (DRI) durch Wasserstoff und Elektrolichtbogenöfen (EAF) durch Strom. Im Dezember 2022 haben sich die Aufsichtsräte von SHS – Stahl-Holding-Saar, Saarstahl und Dillinger, das Kuratorium der Montan-Stiftung-Saar und die Geschäftsführung der SHS – Stahl-Holding-Saar beschlossen, rund 4,6 Milliarden Euro – vorbehaltlich öffentlicher Förderungen – in die Standorte im Saarland und damit in das Projekt Power4Steel zu investieren (Saarschmiede 2023). Ende 2023 hat die EU-Kommission der Förderung durch Bund und Länder offiziell zugestimmt. Die saarländische Stahlindustrie hat im Januar 2024 eine Förderzusage von Bund und Land in Höhe von 2,6 Milliarden Euro erhalten, um den Übergang zur Produktion von „grünem Stahl“ zu finanzieren. Die restlichen zwei Milliarden finanziert das Unternehmen (ZDF 2024). Im Saarland soll eines der modernsten und umweltfreundlichsten Stahlwerke

Europas entstehen, das ab 2030 jährlich 3,5 Millionen Tonnen CO₂-reduzierten Stahl produzieren wird. Durch diese Umstellung können bis zu 5 Millionen Tonnen CO₂ eingespart werden. Im Jahr 2024 haben die ersten Bauarbeiten an den Standorten Dillingen und Völklingen begonnen (Pure Steel o. J.).

Die folgenden Ausführungen basieren wesentlich auf den Ergebnissen von Interviews mit Führungskräften, Mitarbeitenden der Neubauabteilung, Vorarbeitern sowie Mitarbeitern aus der Produktion und Instandhaltung, die im Zusammenhang mit der Dekarbonisierung bei Dillinger und Saarstahl geführt wurden (Hielscher et. al. 2026). Darüber hinaus wurden Dokumente in die Auswertung hinzugezogen, die freundlicherweise von der SHS-Stahl-Holding zur Verfügung gestellt wurden.

5.1

Governance und Genehmigungen: Steuerung zwischen Recht, Technik und Politik

Der Bau neuer Produktionsanlagen in der Stahlindustrie ist nicht nur eine technische Herausforderung, sondern auch ein hochregulierter Prozess. Am Beispiel der Dillinger Hütte agiert die Neubauabteilung als zentrale Koordinationsstelle, in der juristische, technische und organisatorische Anforderungen ineinandergreifen. Hier entstehen Ausschreibungsunterlagen, Vertragswerke, technische Spezifikationen und die Abstimmung mit unterschiedlichen Stakeholdern wie Einkauf, Fachabteilungen, Rechtsberatern und Behörden. Ein wesentlicher Schwerpunkt liegt auf der Förderfähigkeit der Investitionen. Da öffentliche Mittel für

Großprojekte wie Direktreduktionsanlagen (DRI) und Elektrolichtbogenöfen (EAF) nur unter strengen Auflagen gewährt werden, ist eine detaillierte Dokumentation sämtlicher Prozessschritte notwendig. Förderauflagen beinhalten beispielsweise die Verpflichtung, einen bestimmten Mindestanteil an Wasserstoff einzusetzen. Wird dieser nicht erreicht, drohen Rückzahlungen bereits gewährter Mittel – ein erhebliches finanzielles Risiko in einem Umfeld, in dem Wasserstoffverfügbarkeit und -preise aktuell höchst unsicher sind. Die Genehmigungsphase zeigt die Verschränkung ökologischer und regulatorischer Dimensionen und Risiken auf. Das Baufeld in Dillingen lag teilweise auf einer Industriebrache, die über Jahrzehnte ungenutzt blieb. Dadurch wurden umfangreiche Umweltprüfungen erforderlich. Dabei traten artenschutzrechtlich relevante Funde auf – Eidechsen, Frösche und seltene Lilien –, deren Umsiedlung und das entsprechende Monitoring zusätzliche Zeit- und Ressourcenaufwände erforderten.

Auch technische Auflagen wirkten in die Planung hinein. Die neue Anlage wurde emissions- und lärmschutzoptimiert konzipiert. Eine vollständige Einhausung der Aggregate reduziert Lärm- und Staubemissionen erheblich, ist jedoch mit höheren Baukosten und komplexeren Betriebskonzepten verbunden. Mit der erteilten Genehmigung nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) konnte dieser Prozess erfolgreich abgeschlossen werden.

Ein wesentliches Handlungsfeld im Zuge der Transformation der Stahlproduktion betrifft den Bau der erforderlichen Großanlagen selbst. Die Errichtung von Direktreduktionsanlagen, Elektrolichtbogenöfen oder neuer Versorgungsinfrastrukturen erfordert großflächige Baustellen auf den Werksgeländen, auf denen während der Bauphase mehrere Hundert externe Fachkräfte gleichzeitig tätig

sind. Diese hohe personelle und logistische Verdichtung stellt besondere Anforderungen an Projektsteuerung, Arbeitssicherheit und Schnittstellenmanagement. Hinzu kommt die Notwendigkeit, die Bauarbeiten mit den weiterhin laufenden Produktionsprozessen im bestehenden Werk zu koordinieren, um Störungen in der Wertschöpfungskette zu vermeiden. Der Anlagenbau ist somit nicht nur eine technische, sondern auch eine organisatorische Herausforderung, die ein hohes Maß an Abstimmung zwischen Betreiber, Anlagenbauern und Zulieferern erfordert.

5.2

Technologischer Umbau der Prozesskette: Hot-Link bei der DRI/EAF-Route

Der sogenannte *Hot-Link* beschreibt in der DRI/EAF-Route die direkte und möglichst verlustfreie Verbindung zwischen der Produktion von Eisenschwamm (DRI) und seiner Nutzung im EAF (siehe Abb. 13). Im Direktreduktionsprozess entsteht heißes DRI (HDRI) mit Temperaturen von über 600 °C. Anstatt dieses Material abzukühlen und als Cold DRI oder Hot Briquetted Iron (HBI) zu verarbeiten, wird es beim *Hot-Link* unmittelbar in den Elektrolichtbogenofen überführt. Dadurch kann die im Material enthaltene Wärmeenergie genutzt und der energieintensive Schritt der Wiederaufheizung vermieden werden, sodass der Energiebedarf im EAF deutlich sinkt (Midrex 2020a). Technisch wird der *Hot-Link* über geschlossene Transportwege und Zwischenspeicher realisiert, die verhindern, dass das heiße Eisen oxidiert oder zu stark abkühlt (Midrex 2020b). Entscheidend ist dabei, dass die räumliche Nähe von DRI-

Anlage und EAF gegeben ist, um Transportverluste gering zu halten. Die Vorteile des *Hot-Link* liegen vor allem in der Energie- und Ressourceneffizienz. Da das DRI bereits in erhitztem Zustand in den EAF gelangt, reduziert sich der Stromverbrauch erheblich, was gleichzeitig zu niedrigeren CO₂-Emissionen führt. Darüber hinaus verkürzen sich die Schmelzzyklen, wodurch die Produktivität steigt, und auch der Verschleiß von Elektroden und Ausmauerungen nimmt ab (Midrex 2020a). Allerdings erfordert die Umsetzung beträchtliche Investitionen in Anlagendesign und Logistik, da Transportwege isoliert und Prozesse exakt aufeinander abgestimmt werden müssen. Im Rahmen des Projekts *Power4Steel* bei Dillinger und Saarstahl ist der Bau einer solchen Hot-Link-Verbindung vorgesehen. Damit soll der Eisenschwamm aus der geplanten DRI-Anlage in Dillingen (Dillinger) direkt und heiß in den dortigen Elektrolichtbogenofen eingespeist werden. Ziel ist es, die Effizienz der neuen Produktionsroute zu steigern und die Dekarbonisierungsziele schneller zu erreichen (Innovation Centre for Industrial Transformation 2023). Diese technologische Lösung ist jedoch nur auf dem Dillinger Werksgelände möglich. Für Transporte nach Völklingen (Saarstahl) – wo ein weiterer EAF entsteht – muss das DRI zwischengelagert und erneut erhitzt werden. Daraus ergeben sich zusätzliche logistische und energetische Herausforderungen. Es müssen neue Lagerstätten gebaut, Transportketten angepasst und die entstehende Prozesswärme erneut bereitgestellt werden.

Wir können die CO₂-Ziele mit neuen Produktionsanlagen erreichen Umstieg auf Direktreduktion und Elektrostahl

Prozess: Ersetzen des Reduktionsmittels Kohlenstoff durch Wasserstoff (Quelle: grün oder Reformer /Erdgas)
Produkt: Eisenschwamm / Direct Reduced Iron (DRI)
Weitere Verarbeitung: Im Elektrolichtbogenofen (EAF) zusammen mit Schrott zu Rohstahl



Abbildung 13: DRI/EF Route, Quelle: SHS

Der Elektrolichtbogenofen wird zum Nadelöhr

Der Elektrolichtbogenofen (EAF) ist das zentrale Nadelöhr in der neuen Produktionsroute. Fällt der EAF in Dillingen – sei es durch geplante Wartungen oder ungeplante Störungen – aus, kann in dieser Zeit kein Stahl erschmolzen werden. Das bedeutet, dass keine Rohstahlproduktion stattfindet und somit auch kein Material für die nachgelagerten Prozesse zur Verfügung steht. Jeder Stillstand verursacht erhebliche Kosten, da die gesamte Wertschöpfungskette ins Stocken gerät. Jede Minute ohne laufenden EAF bedeutet, dass keine Stahlproduktion erfolgt und entsprechend kein Umsatz generiert wird (Lüngen 2021; Midrex 2020a).

Im Unterschied zum Elektrolichtbogenofen (EAF) stellt der Konverter in der klassischen Hochofenroute kein so ausgeprägtes Nadelöhr dar. In integrierten Hüttenwerken stehen in der Regel mehrere Konverter parallel zur Verfügung, sodass die Stahlproduktion nicht von einem einzelnen Aggregat abhängig ist. Fällt einer aus, können die übrigen Konverter

den Materialfluss übernehmen, während das aus den Hochöfen kontinuierlich anfallende Roheisen zeitversetzt verarbeitet wird. Zudem sind Wartungen oder Ausmauerungen an Konvertern planbar und können durch den Parallelbetrieb anderer Aggregate abgefangen werden.

Durch zusätzliche organisatorische Puffer wie Pfannenlogistik und Zwischenlagerung lässt sich der Produktionsprozess flexibel steuern. Dadurch entstehen beim Konverterbetrieb keine unmittelbaren Totalausfälle, wie sie beim EAF auftreten können, wo bereits eine kurze Unterbrechung die gesamte Rohstahlproduktion stilllegt (Lüngen 2021; Peters 2016).

Stahlproduktion: Neue Anforderungen an die Prozesse

Die CO₂-arme Produktion von Stahl kann nicht nur aus technologischer Sicht betrachtet werden. Sie geht auch mit einem Wandel der Arbeitsweise und neuen wertschöpfungskritischen Produktions- und Arbeitsprozessen einher. Weil bei Störungen oder Stillstand des EAF keine parallele Auffanglösung

zur Verfügung steht, wird insbesondere eine minutiös getaktete Prozessdisziplin notwendig. Daher muss insbesondere der Instandhaltungsprozess zukünftig effizient gestaltet werden. Dieser verlangt neue Wartungsstrategien, bei denen Prozesse beispielhaft so reibungslos ablaufen müssen wie ein „Reifenwechsel in der Formel 1“. Ein Beispiel für diese neuen Anforderungen ist der Elektrodenwechsel beim Elektroofen (siehe Abb.14 und Abb.15), der mehrmals täglich und schnellstmöglich durchgeführt werden muss. Die Abläufe müssen exakt einstudiert werden, um Produktionsausfälle zu minimieren. Dabei ist der Einsatz gut qualifizierter Instandhaltung-Teams entscheidend.



Abbildung 14: EAF Dillinger, Quelle: SHS

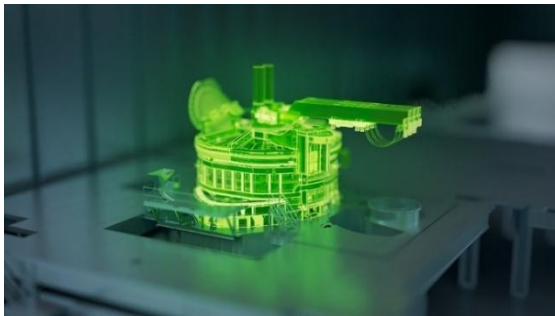


Abbildung 15: EAF Saarstahl, Quelle: SHS

5.3

Energie- und Wasserstoffinfrastruktur: Zwischen Versorgungssicherheit und Volatilität

Die Energieversorgung bildet einen weiteren kritischen Punkt der Dekarbonisierung. Während die neue DRI-Anlage prinzipiell Wasserstoff-basiert laufen kann, muss die Anlaufphase mit Erdgas erfolgen. Der Grund liegt darin, dass ausreichende Mengen an grünem Wasserstoff in absehbarer Zeit nicht zur Verfügung stehen. Die aktuellen geopolitischen Entwicklungen verschärfen die Lage. Der russische Angriffskrieg gegen die Ukraine und der militärische Konflikt zwischen den USA, Israel und dem Iran haben die bisherigen Importströme von Erdgas unterbrochen und zwingen die Unternehmen, teureres Gas am Weltmarkt einzukaufen. Gleichzeitig wird die Herkunft von Strom zu einer politischen Frage. Stromimporte aus Frankreich werden in Deutschland bilanziell als „grün“ eingestuft, obwohl sie überwiegend aus Kernenergie stammen. Dillinger und Saarstahl versuchen, dieses Problem zu umgehen, indem sie sich an Offshore-Windparks beteiligen, um sich rechnerisch grüne Strommengen zu sichern. Die technische Umstellung auf Wasserstoff erfordert den Ausbau zusätzlicher Infrastruktur, wie Prozessgaskompressoren und größere Rohrleitungen, da Wasserstoff ein deutlich geringeres Energievolumen besitzt und deshalb etwa die dreifache Durchsatzmenge benötigt. Großvolumige Speicher wurden aus Kosten- und Platzgründen verworfen. Das bedeutet, dass die Anlagen mit flexiblen Lieferprofilen umgehen müssen. Diese Profile („as produced“) hängen unmittelbar von der Verfügbarkeit der erneuerbaren Energie ab.

Bei Sonnenschein kann mehr Wasserstoff geliefert werden, bei Dunkelheit oder Windflaute deutlich weniger. Für eine Industrieanlage, die kontinuierlich laufen soll, ist dies eine massive Herausforderung. Dennoch verlangen Förderauflagen, dass ein bestimmter Jahresdurchschnittswert an H₂-Einsatz erreicht wird. Das Unternehmen muss also Prozesse so steuern, dass trotz dieser Unsicherheiten ein gleichbleibendes Produkt erzeugt wird – also ein Balanceakt zwischen technischer Prozessstabilität und politisch vorgegebenen Förderbedingungen.

Wasserstoff-Liefervertrag mit Verso Energy

Ein wichtiger Schritt im Rahmen des Transformationsprozess ist der im Jahr 2025 geschlossene Vertrag zwischen der SHS – Stahl-Holding-Saar (mit den Unternehmen Dillinger, Saarstahl und ROGESA) und dem französischen Energieunternehmen Verso Energy. Ab 2029 wird Verso Energy jährlich mindestens 6.000 Tonnen zertifizierten grünen Wasserstoff bereitstellen. Produziert wird dieser in Carling (Frankreich) durch Elektrolyse unter Einsatz erneuerbarer Energien. Die Vereinbarung hat eine Laufzeit von zehn Jahren und soll den Startpunkt für eine grenzüberschreitende Wasserstoffwirtschaft in der Großregion markieren (SHS 2025). Verso Energy plant hierzu Investitionen von zunächst rund 100 Millionen Euro in den Bau einer Elektrolyseanlage. Der erzeugte Wasserstoff wird über das Netz der Betreiber Creos und NaTran (ehemals GRTgaz) in das saarländische Stahlrevier transportiert und dort in der Produktion eingesetzt (Creos 2025; Verso Energy 2025). Gleichzeitig verdeutlicht die geplante Liefermenge die Dimension der Herausforderungen. Langfristig wird die SHS-Gruppe rund 120.000 Tonnen Wasserstoff pro Jahr benötigen, also das

Zwanzigfache der vereinbarten Anfangsmengen. Der Vertrag mit Verso Energy stellt somit einen Einstieg in den industriellen Hochlauf dar, deckt den Bedarf aber nur zu einem geringen Teil (H2-News.de 2025; SHS 2025).

Infrastrukturaufbau: mosaHYc und Wasserstoff-Kernnetz

Parallel zur Versorgungssicherheit durch Verso Energy wird die notwendige Infrastruktur für den Transport und die Verteilung von Wasserstoff aufgebaut. Zentrales Element ist das Projekt mosaHYc (Moselle-Saar-Hydrogen-Conversion), das eine etwa 100 Kilometer lange Pipeline-Verbindung zwischen Frankreich, Luxemburg und dem Saarland vorsieht. Hierbei werden rund 70 Kilometer bestehender Erdgasleitungen umgestellt und etwa 30 Kilometer Neubauleitungen errichtet (siehe Abb.16). Ziel ist es, ab 2027 erste industrielle Abnehmer wie die saarländische Stahlindustrie mit Wasserstoff versorgen zu können (Creos 2025). Das Projekt ist Teil des europäischen Förderprogramms IPCEI Hydrogen und bildet zusammen mit dem geplanten deutschen Wasserstoff-Kernnetz die Basis für eine transnationale Energietransformation.

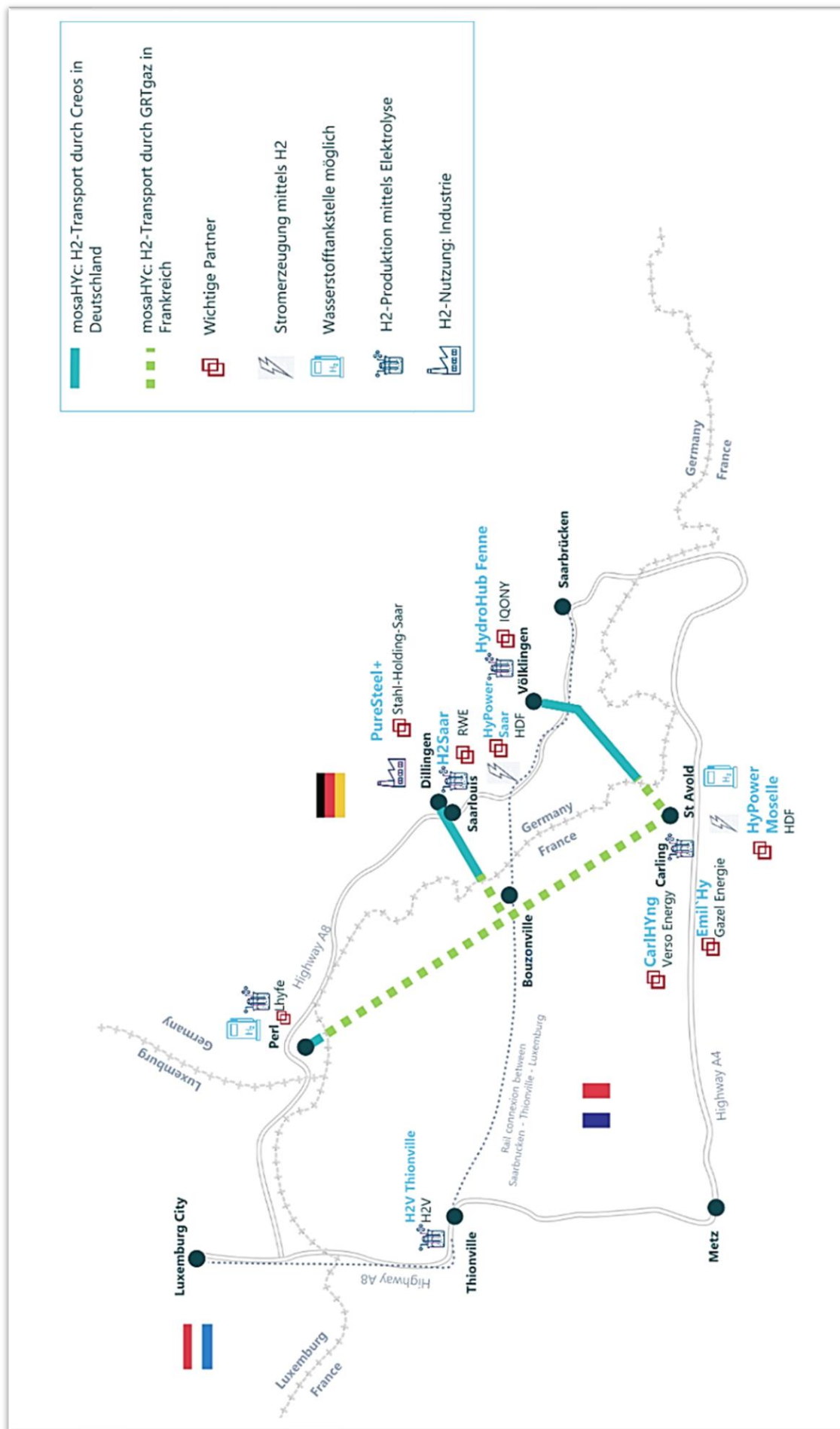


Abbildung 16: Das transnationale Wasserstoffnetz mosaHYc, © Vereinigung der Saarländischen Unternehmensverbände e. V. & © europakarte.org, Quelle: mosaHYc: [Finale Investitionsentscheidung für Wasserstoffprojekt - H2-news.de](https://www.mosaHYc.de)

5.4

Sicherheit, Qualifikation und Kompetenzaufbau: Neue Curricula für neue Risiken

Mit der Einführung von Wasserstoff als Energieträger verschieben sich auch die Anforderungen an Sicherheit und Kompetenz. Wasserstoffleitungen mit 100 % Wasserstoff erfordern strenge Standards für Betrieb, Inertisierung (Verfahren des Brand- und Explosionsschutzes) und Störfallprävention. Diese erweiterten Anforderungen müssen in Aus- und Weiterbildungscurricula integriert werden. Simulator-Trainings ermöglichen es, risikofrei Szenarien wie Leckagen, Störfälle oder Notabschaltungen zu üben. Parallel steigen die Anforderungen in Bereichen wie Medienversorgung, Thermodynamik und Anlagensteuerung. Für die Qualifikation der Belegschaft wurde ein gestuftes System entwickelt:

- ▶ Der Anlagenbauer Midrex bietet ein eigenes Trainingsprogramm für die Bedienung der DRI an.
- ▶ Geplant ist, die betreffenden Beschäftigte an bestehenden DRI-Anlagen im Ausland für mehrere Wochen zu schulen (Katar, Saudi-Arabien, Ägypten).
- ▶ Stattdessen wird ein „digitaler Zwilling“ der DRI-Anlage entwickelt, mit dem Prozesssimulationen vor Ort durchgeführt werden können.
- ▶ Ergänzend finden Schulungen zu Wasserstoffsicherheit und neuen Betriebsabläufen statt.
- ▶ Während der Kaltinbetriebnahme begleiten Supervisoren des Anlagenbau-

ers die so genannte „Inbetriebnahmeschicht“, mit dem Ziel, die Verantwortung sukzessive auf das eigene Personal zu übertragen.

- ▶ Diese Maßnahmen verdeutlichen, dass die Dekarbonisierung nicht nur technologische Innovationen erfordert, sondern auch einen teils umfassenden Kompetenzaufbau in der Belegschaft.

5.5

Logistik und Rohstoffversorgung: Der Paradigmenwechsel zum Schrott

Die Umstellung auf die Elektrostahlproduktion bedeutet ferner, dass künftig ein deutlich höherer Anteil an Schrott eingesetzt wird – perspektivisch bis zu zwei Millionen Tonnen pro Jahr bei Dillinger. Dies markiert einen Paradigmenwechsel in der Materialversorgung. Um dies zu ermöglichen, sind umfassende Infrastrukturmaßnahmen notwendig, wie:

- ▶ der Ausbau des zentralen Hafens in Dillingen,
- ▶ der Bau und die Einrichtung zusätzlicher Kurzfristlager sowie
- ▶ die Entwicklung von Konzepten zur Schrottveredelung (z. B. Sortierung minderwertigen Schrottes zur Qualitätssteigerung).

Die Transportlogistik innerhalb der Werke ändert sich damit fundamental. Die Roheisenzüge (Torpedowagen) werden sukzessive durch Schrott- und DRI-Wagen ersetzt. Die Werkstätten und Lager der Torpedowagen müssen verlagert werden, um Platz für

neue Aggregate wie den EAF zu schaffen (Standortwechsel von Völklingen nach Dillingen).

Führungskräfte beschreiben die Situation zugespitzt: „Wir haben in Zukunft 2 Millionen Tonnen Schrott umzuschlagen – die Logistikkette existiert aber noch nicht.“ Eine neu aufgebaute und leistungsfähige Logistikkette ist somit wesentliche Voraussetzung für das Funktionieren der neuen Produktionsroute.

5.6

Produktions- und Personalorganisation im Parallelbetrieb: „Transformation am offenen Herzen“ – am Beispiel Dillinger und Saarstahl

Der Transformationsprozess erfordert im Allgemeinen für mehrere Jahre einen Parallelbetrieb der alten Hochofenroute mit Konvertern und der neuen DRI/EAF-Technologie. In Dillingen wird der Elektrolichtbogenofen (EAF im 3. Quartal 2029 in Betrieb genommen. Die neue DRI-Anlage soll bereits im 2. Quartal 2029 in den Kaltbetrieb gehen und ab dem 4. Quartal 2029 die Produktion von Eisenschwamm aufnehmen. Zudem ist bis 2045 der Bau und die Inbetriebnahme eines dritten EAF geplant. Bis zu diesem Zeitpunkt erfolgt die Rohstahlproduktion im Dillinger EAF mit Schrott sowie zugekauftem Eisenschwamm. Während dieser Hochlaufphase laufen die Hochöfen und Konverter in Dillingen parallel weiter. Dies ist notwendig, da die beiden geplanten Elektroöfen zusammen eine Produktionskapazität von etwa 3,5 Mio. Tonnen Stahl pro Jahr aufweisen, während

die heutige Produktion bei 4,9 Mio. Tonnen liegt. Ein vollständiger Ersatz der Hochofenroute ist deshalb kurzfristig nicht möglich. Erst durch den geplanten Zubau oder zusätzliche Materialimporte (z. B. Roheisen, Eisenschwamm) kann die Differenz ausgeglichen werden. Offiziell ist vorgesehen, dass bis spätestens 2030 der erste Hochofen in Dillingen stillgelegt wird, was mit einer CO₂-Reduktion von rund 55 % durch die neue Route verbunden ist (SHS 2023a, SHS 2023b).

In Völklingen wird der neue EAF im 3. Quartal 2028 im Kaltbetrieb in Betrieb genommen, mit dem Ziel, ab dem 2. Quartal 2029 in den Heißbetrieb zu gehen. Auch dort wird es einen Parallelbetrieb mit den Konvertern geben. Konkrete Abschalttermine für die LD-Konverter sind bisher nicht veröffentlicht. Nach aktueller Planung soll „bis Anfang der 2030er Jahre“ rund 70 % der Produktionskapazität CO₂-reduziert über die DRI/EAF-Route laufen. Der Parallelbetrieb finanziert die Transformation durch den laufenden Stahlverkauf. Gleichzeitig bedeutet es für die Unternehmen erhebliche betriebliche und organisatorische Herausforderungen. Während der Hochfahrkurve müssen alte und neue Anlagen gleichzeitig betrieben und instandgehalten werden, was zusätzlichen Personalbedarf erzeugt. Langfristig ist vorgesehen, dass bis 2045 ein weiterer EAF gebaut und in Betrieb genommen wird und dann die Stahlproduktion vollständig klimaneutral erfolgen soll (SHS 2023a; SHS 2023b).

Wie beschrieben ist ein wesentliches Merkmal der Transformation der Parallelbetrieb von alter Hochofenroute und neuer DRI/ EAF-Route. Dieser Zustand wird mindestens bis 2032 andauern, solange die EAF nicht die Kapazitäten des Konverters erreichen. Dies führt zu Spannungsfeldern. Einerseits muss der Konverter ausgelastet bleiben, um Spezialstähle produzieren zu können. Andererseits erfordert die Investitionslogik, dass die neuen Aggregate hochgefahren werden. Hinzu kommt die Unsicherheit, ob CO₂-Speicherung politisch tragfähig wird, was die Rolle des Konverters neu definieren könnte. Die Integration neuer Aggregate in laufende Produktionsprozesse gleicht „einer Operation am offenen Herzen“. Gleichzeitig werden Sekundärmetallurgie und Wärmerückgewinnung ausgebaut, um die Qualität der Stahlprodukte und die Energieeffizienz zu sichern.

späteren Minderbedarf durch die natürliche Fluktuation aufzufangen. Einerseits müssen während des Parallelbetriebs mehr Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter als langfristig benötigt eingestellt werden, andererseits sind gezielte Umschulungen und Neueinstellungen erforderlich, um den Betrieb der neuen Anlagen sicherzustellen. So werden Beschäftigte in speziellen „Inbetriebnahmeschichten“ sukzessive an den Betrieb herangeführt. Unsicherheit über die genaue Personalzuweisung bleibt jedoch bestehen. Unklar ist aktuell, wie viele und welche Berufsgruppen konkret betroffen sein werden. Für das Hochfahren der Anlagen planen Dillinger und Saarstahl rückwärts vom Inbetriebnahmedatum. So können die „Inbetriebnahmeschichten“ rechtzeitig personalisiert werden. Geplant ist die Betroffenen ca. 1 bis 2,5 Jahre vor der Inbetriebnahme aus dem Tagesgeschäft herauszulösen. Diese Gruppen werden ge-

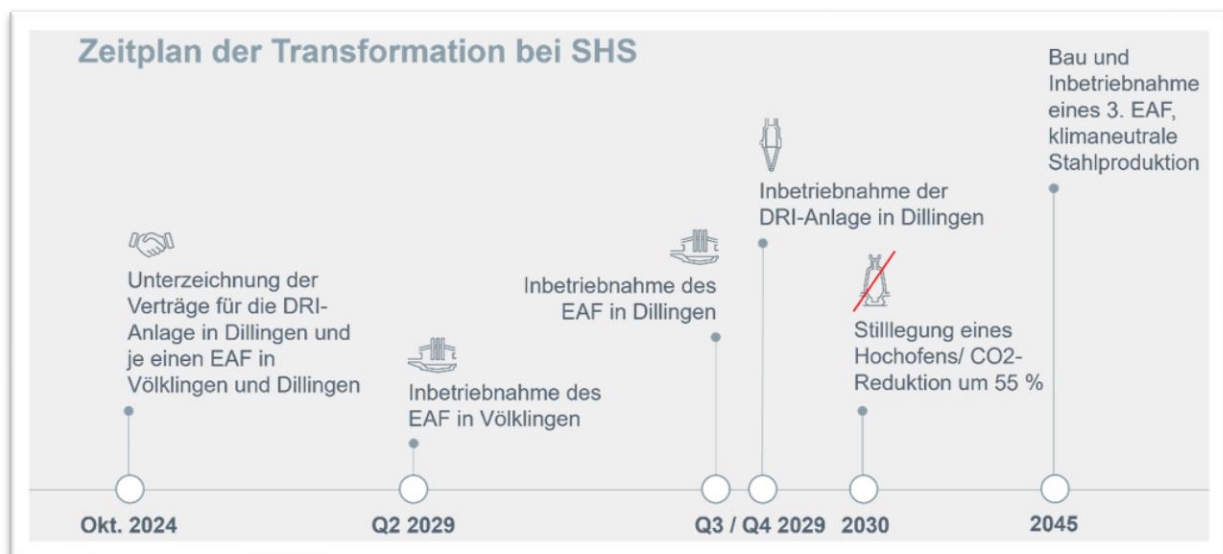


Abbildung 17: Zeitplan der Transformation, Quelle: SHS

Der temporäre Parallelbetrieb ist eine besondere Herausforderung für das Personalmanagement. Denn im Parallelbetrieb steigt zunächst der Personalbedarf, während er sich später mit dem Abschalten der Alt-Anlagen wieder reduziert. Für das Unternehmen geht es darum, den Mehrbedarf mit möglichst wenig Neueinstellungen abzudecken und den

schult und begleiten den Aufbau der Anlage. Zudem sollen zusätzliche Ausbildungsplätze geschaffen werden, vor allem durch weitere Berufsbilder wie Chemikant:innen für die DRI-Anlage. Um den Personalbedarf während des Parallelbetriebs zu gewährleisten, wurde im Jahr 2023 die Anzahl der Auszubildenden verdoppelt. Gleichzeitig bringt der

Parallelbetrieb eine erhöhte Belastung im 24-Stunden-Betrieb mit sich, da Störungen, Reparaturen und Wartungen sowohl an alten als auch an neuen Anlagen parallel bewältigt werden müssen. Dies erfordert schnelle Reaktionszeiten und eine enge Verzahnung von erfahrenem und neuem Personal. Durch ein so genanntes Multiplikatorenmodell, bei dem erfahrene Fachkräfte als Mentoren agieren, soll ein gezielter Wissenstransfer und ein nachhaltiger Wissensaufbau innerhalb der Belegschaft sichergestellt werden. Die neuen Anlagen benötigen durch den Wegfall der Kokerei, Sinteranlage etc. sowie der Automatisierung vieler Prozesse zukünftig weniger Personal. Betriebsbedingte Kündigungen sind in diesem Zusammenhang jedoch nicht geplant. Der Personalabbau soll durch die Verrentung der „Baby-Boomer“-Generation sukzessive erfolgen (detaillierte Informationen zum Parallelbetrieb siehe Hielscher et. al. 2026).

5.7

Inbetriebnahme-Prozesse der neuen Anlagen

Die Inbetriebnahme neuer Großanlagen wie DRI und EAF stellt einen hochkomplexen Prozess dar, der sich über Monate bis Jahre erstreckt und dessen erfolgreiche Abwicklung für den langfristigen Betrieb entscheidend ist. Technische, organisatorische und qualifikatorische Dimensionen greifen hier ineinander. Üblicherweise wird der Prozess in drei Phasen unterteilt: Kaltinbetriebnahme, Heißeinbetriebnahme und Leistungsfahrt.

Kaltinbetriebnahme: Vorbereitung und Funktionstests

Die Kaltinbetriebnahme markiert den ersten praktischen Schritt. Hierbei werden die gesamten Anlagenteile – von Fördersystemen über Ventile bis hin zu elektrischen Antrieben – ohne thermische Belastung geprüft. Typische Maßnahmen sind: Funktionstests der Aggregate (z. B. Pumpen, Kompressoren, Lüftungssysteme), Prüfung der Drehrichtungen von Antrieben und Förderbändern sowie simulierte Materialtransporte mit kaltem Gut, um Prozessketten nachzustellen (VDMA 2020). Ein besonderer Aspekt ist, dass bereits in dieser frühen Phase die Einleitung von Wasserstoff als kaltem Gas möglich ist. Damit lassen sich Dichtungsprüfungen durchführen und erste Erfahrungen im Umgang mit dem neuen Medium sammeln (Midrex 2020a). Aus Sicht der Qualifizierung ist die Kaltinbetriebnahme ein Lernfeld für die Belegschaft. Beschäftigte können die Anlage in einem risiko-armen Umfeld kennenlernen, Funktionsabläufe beobachten und erste Routinen entwickeln (Peters 2016).

Heißeinbetriebnahme: Übergang in den Probetrieb

Die Heißeinbetriebnahme stellt den eigentlichen Übergang vom Bau- zum Produktionsbetrieb dar. Charakteristisch ist hier die aktive Zuschaltung des Reformers (Der Reformer ist ein großtechnischer Reaktor, in dem Erdgas mit Wasserdampf und/oder Kohlendioxid umgesetzt wird.) in der DRI-Anlage sowie die thermische Belastung aller zentralen Systeme. Nun werden erstmals Produktionsbedingungen simuliert, inklusive Gasflüsse unter hoher Temperatur, chemischer Reaktionen der Reduktion und Belastungstests für feuerfeste Materialien und Schmelzaggregate (Wuppermann 2021). Diese Phase ist besonders risikobehaftet, da sich viele Unwägbarkeiten zeigen, wie das

Materialverhalten unter Hitze, die Prozessstabilität sowie die Interaktion zwischen DRI und EAF (Midrex 2020b). Für die Belegschaft ist es entscheidend, kompetent darin zu sein, Störungen schnell zu erkennen und zu beheben. Aus Sicht des Anlagenbauers und des Unternehmens bedeutet die Heiinbetriebnahme einen engen Schulterschluss: Der Prozess wird von Supervisoren des Anlagenbauers begleitet (SHS 2023a).

Leistungsfahrt: Stabilisierung und Optimierung

Die Leistungsfahrt bildet die dritte und entscheidende Phase. Hier geht es darum, die im Planungsstadium definierten Kennzahlen – etwa Produktionsmengen, Energieeinsatz pro Tonne Stahl, Wasserstoffquote oder Qualitätsparameter – zu erreichen und langfristig zu stabilisieren (Lngen 2021).

In dieser Phase verschiebt sich der Fokus von reinen Funktionstests hin zu Prozessoptimierung. Dazu zählen die Identifikation und Beseitigung von Engpässen, Feinjustierung von Steuerparametern, Aufbau von Routinen für störungsarmen Betrieb sowie die Integration der Anlage in das übergreifende Produktionsnetzwerk (z. B. Schrottlogistik, Sekundärmetallurgie, Energieverbund). Organisatorisch wird die Leistungsfahrt eng mit Qualifizierungsmanahmen verknüpft. Beschäftigte, die zuvor in Kalt- und Heiinbetriebnahme erste Erfahrungen gesammelt haben, übernehmen nun schrittweise vollständige Bedien- und Steuerungsaufgaben. Dies stellt sicher, dass beim Übergang in den Regelbetrieb eine Belegschaft vorhanden ist, die sowohl praktische Erfahrung als auch theoretisches Prozesswissen besitzt.

Die drei Phasen der Inbetriebnahme sind nicht isoliert, sondern eng mit der Personal- und Kompetenzentwicklung verbunden: In der Kaltinbetriebnahme lernen Beschäftigte

die Anlage technisch kennen, ohne gleich mit Produktionsdruck konfrontiert zu sein. In der Heiinbetriebnahme sammeln sie Erfahrungen im Risikomanagement unter realen Prozessbedingungen. In der Leistungsfahrt übernehmen sie schrittweise die volle Verantwortung für Betrieb und Steuerung.

Für Dillinger und Saarstahl bedeutet dies, dass die Inbetriebnahme nicht nur als technischer Prozess, sondern auch als Aufbau von Kompetenzen und als Bewhrungstest für das sichere Funktionieren der betrieblichen Anlagen- und Ablauforganisation verstanden wird. Sie dient dazu, das notwendige Erfahrungswissen aufzubauen, ohne das der langfristige Betrieb nicht gewährleistet werden kann (SHS 2023a).

5.8

Auswirkungen der Transformation auf die einzelnen Bereiche der Stahlproduktion

Die Umstellung von der Hochofen-Route zur DRI-/EAF-Route wirkt sich innerhalb der Werke nicht einheitlich auf alle Beschäftigtengruppen aus. Vielmehr zeigt sich eine differenzierte Betroffenheit, die je nach Bereich sehr unterschiedlich ausfllt.

Schmelzbetrieb: Fundamentale Umbruche im Arbeitsprofil

Im Schmelzbetrieb wird mit dem Übergang vom Konverter zum Elektrolichtbogenofen eine grundlegende Veränderung der Arbeit erwartet. Der EAF verlangt ein anderes Prozessverständnis. Statt kontinuierlicher LD-Konverter-Prozesse dominiert ein zyklischer Schmelzbetrieb mit stark schwankenden

Energiebedarfen. Beschäftigte müssen lernen, Prozesssignale zu deuten – beispielsweise anhand von Stromkurven, Schmelzverhalten oder visuellen Indikatoren des flüssigen Stahls. Neue Kompetenzanforderungen betreffen nach Einschätzung betrieblicher Experten insbesondere:

- ▶ den Umgang mit Hochspannungstechnik,
- ▶ die schnelle Reaktion auf Störungen im Schmelzprozess,
- ▶ das präzise Management von Schrott- und DRI-Chargen,
- ▶ sowie die Integration von Wärmerückgewinnung und Sekundärmetallurgie.

Insgesamt bedeutet dies für den Schmelzbetrieb einen kompletten Rollenwandel: vom klassischen „Stahlkocher“ zum prozesssteuernden Anlagenfahrer, dessen Arbeit stark durch Datenkompetenz und Reaktionsgeschwindigkeit geprägt ist.

Gießbetrieb: Graduelle Anpassungen statt fundamentaler Brüche

Im Gießbetrieb sind die technologischen Kernprozesse – das Abgießen und Erstarren des flüssigen Stahls – weitgehend unabhängig vom Primärprozess der Stahlerzeugung. Ob das Rohmaterial aus einem Konverter oder einem Elektrolichtbogenofen stammt, spielt für die grundsätzlichen Arbeitsschritte der Formgebung, Abkühlung und Qualitätskontrolle nur eine untergeordnete Rolle.

Die Beschäftigten im Gießbetrieb sehen sich daher überwiegend mit graduellen Veränderungen konfrontiert. Anpassungen ergeben sich vor allem durch unterschiedliche chemische Zusammensetzungen des Stahls und durch veränderte Taktzeiten, die mit dem EAF-Betrieb einhergehen können. Hinzu kommen neue Schnittstellen in der Produkti-

onslogistik, etwa wenn Stahlchargen in kleinerer, aber schnellerer Abfolge bereitgestellt werden. Insgesamt bleibt das berufliche Rollenprofil stabil, sodass dieser Bereich in der Transformation relativ geringe Disruptionen erfährt.

Instandhaltung: Doppelte Zuständigkeit im Parallelbetrieb

Besonders komplex ist die Lage in der Instandhaltung. Während des länger dauernden Parallelbetriebs müssen die Beschäftigten zwei Systeme gleichzeitig beherrschen:

- ▶ die bekannte Hochofen-/Konverter-Technologie mit ihren über Jahrzehnte etablierten Wartungsroutinen und bekannten Störungsprofilen,
- ▶ und die neuen Aggregate (DRI und EAF) mit völlig anderen, größtenteils unbekannten Verschleiß- und Störungsprofilen.

Dies verlangt eine Erweiterung der Kompetenzen – die Mitarbeiter:innen der Instandhaltung müssen nicht nur weiterhin die Hochöfen, Torpedowagen und Konverter warten, sondern parallel Hochspannungssysteme, Wasserstoffleitungen und digitale Steuerungssysteme der neuen Route betreuen. Hinzu kommen veränderte Wartungszyklen. Während die Konverter oft auf längere Betriebsperioden ausgelegt sind, erfordern EAF und DRI kürzere, intensivere Wartungsintervalle. Auch die Arbeitsorganisation wird sich ändern. Eingespielte Werkstattteams müssen künftig flexibel zwischen alter und neuer Technik wechseln, was eine erhebliche Weiterbildungs- und Belastungsanforderung bedeuten kann.

5.9

Ökonomische und politische Rahmenbedingungen der Dekarbonisierung

Während der technologische Wandel hin zu DRI und EAF klar definiert ist, entscheidet die Kostenstruktur der Energieträger und die europäischen Rahmenbedingungen letztlich über die Wettbewerbsfähigkeit der neuen Produktionsroute. Hierbei spielen die Energiepreise, die Verfügbarkeit von Wasserstoff sowie die Opportunitätskosten für die weitere Nutzung fossiler Rohstoffe eine zentrale Rolle. All diese Faktoren unterliegen in hohem Maße der politischen Rahmensetzung.

Energiepreise als Schlüsselgröße

Im klassischen Hochofenverfahren spielten Personalkosten und Rohstoffpreise (Erz, Koks, Zuschläge) eine dominante Rolle in der Kostenstruktur. Mit der Umstellung auf Elektrostahlproduktion verschiebt sich der Schwerpunkt: Die Stromkosten werden zum zentralen Wettbewerbsfaktor. Ein EAF verbraucht pro Tonne Rohstahl mehrere hundert Kilowattstunden elektrische Energie. Schon geringe Preisschwankungen im Strommarkt können daher die Produktionskosten erheblich beeinflussen. Hinzu kommt der Wasserstoffpreis als ein zukünftig weiterer dominanter Kostenfaktor. Doch zurzeit ist Wasserstoff weder klimaneutral noch konventionell hergestellt in hinreichender Menge verfügbar. Insofern werden mittelfristig in erheblichem Umfang Kosten für den alternativen Einsatz von Erdgas anfallen.

Während die Personalkosten damit relativ an Gewicht verlieren, steigt die Abhängigkeit von volatilen Energiemärkten deutlich an. Unternehmen wie Dillinger und Saarstahl bewegen sich damit in einem Spannungsfeld zwischen technologischem Fortschritt und ökonomischer Verwundbarkeit.

Verfügbarkeit, Infrastruktur und Definition von „grünem Wasserstoff“

Die Umstellung der Stahlindustrie auf wasserstoffbasierte Produktionsverfahren ist ein vielschichtiger Prozess, der technologische, ökonomische und politische Dimensionen umfasst. Besonders herausfordernd ist die Versorgung mit grünem Wasserstoff in ausreichendem Umfang, was einen massiven Ausbau erneuerbarer Energien sowie tragfähige Importlösungen voraussetzt. Hinzu kommt, dass die neuen Verfahren derzeit deutlich höhere Kosten verursachen als die konventionelle Hochofenroute, sodass stabile Fördermechanismen und ein verlässlicher regulatorischer Rahmen unverzichtbar sind, um Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Neben der Kostenfrage erfordert der Umbau eine komplett neue Infrastruktur – von Elektrolyseuren über Transport- und Speicherlösungen bis hin zu Anlagen für Wasserstoffderivate. Gleichzeitig müssen Produktionsprozesse grundlegend neugestaltet werden: Direktreduktionsanlagen und Elektrolichtbogenöfen stellen andere Anforderungen an Energieversorgung und Betrieb als traditionelle Hochofen, was auch die Weiterbildung der Belegschaften notwendig macht (Hans-Böckler-Stiftung 2022; AI / AE 2019; Agora Industry 2024; WV Stahl 2025; Handelsblatt 2024).

Ein weiteres Problem entsteht durch uneinheitliche regulatorische Definitionen. So gilt in Frankreich Wasserstoff, der mit Atomstrom produziert wird, als klimaneutral und damit als „grün“, während in Deutschland

hingegen dieser Wasserstoff nicht als „grün“ eingestuft wird, da Atomstrom nicht als erneuerbare Energie gilt. Für Unternehmen bedeutet dies, dass derselbe Energieträger je nach nationalem Kontext unterschiedlich bewertet wird. Daraus entstehen Handelshemmnisse und Planungsunsicherheiten: Soll man in langfristige Lieferverträge mit französischen Produzenten investieren, wenn unklar ist, ob diese Mengen in Deutschland auf die Erfüllung von Förderauflagen angerechnet werden?

Internationale Importpfade und Netzentgelte

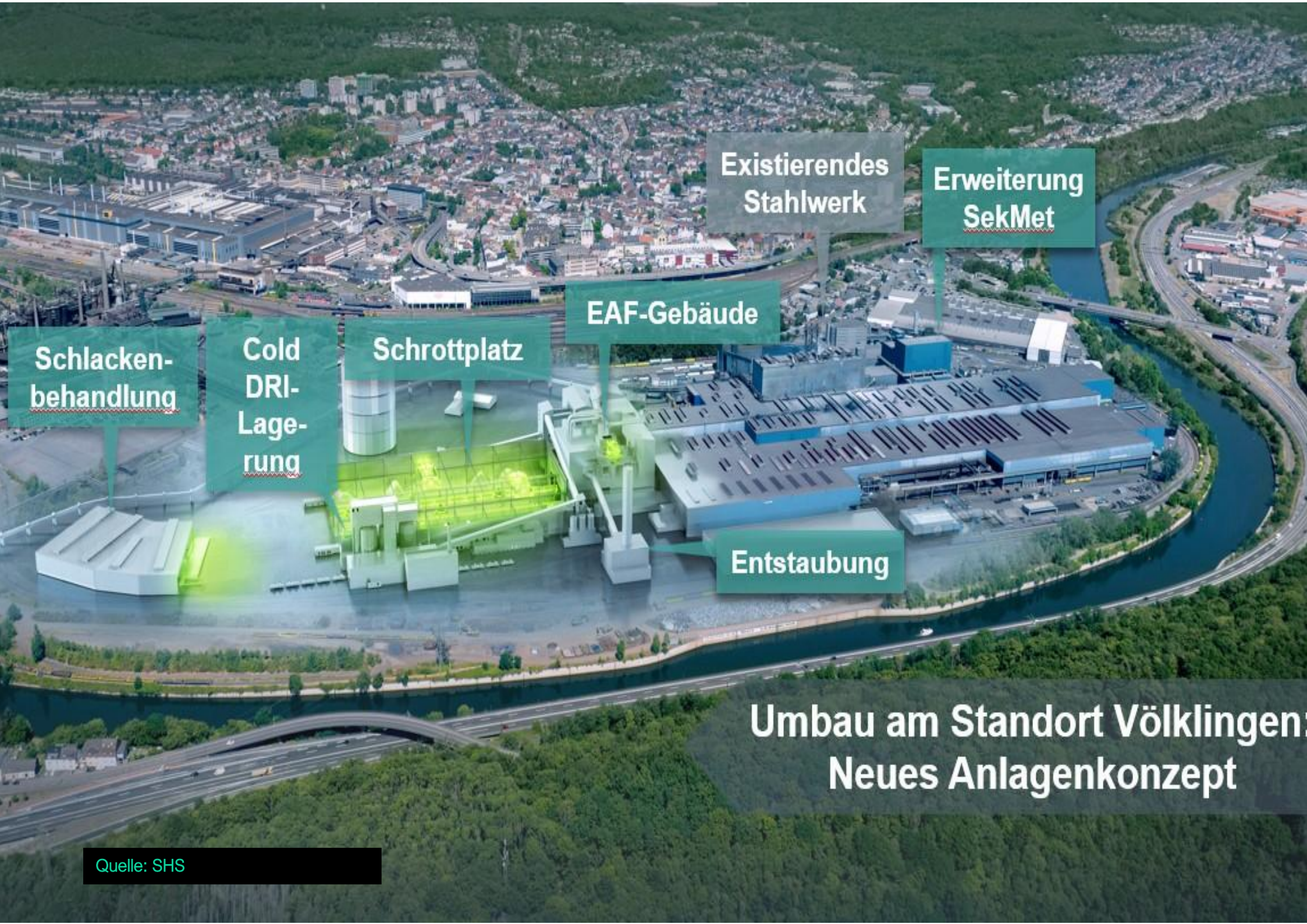
Neben der Frage der Definition spielt auch die physische Bereitstellung von Strom und Wasserstoff eine Rolle. Internationale Importpfade, etwa über Pipelines oder Stromleitungen aus Südeuropa oder Nordafrika, werden grundsätzlich als vielversprechend angesehen. Allerdings werden diese durch Netzentgelte zusätzlich verteuert. Nach Einschätzung betrieblicher Experten können paradoxerweise die Transportkosten in Form von Netzentgelten höher ausfallen als der eigentliche Strom- oder Wasserstoffpreis am Ursprungsort. Für energieintensive Industrien wie die Stahlproduktion kann dies zu erheblichen Wettbewerbsnachteilen führen und die Standortattraktivität Europas im internationalen Vergleich schwächen.

Politisch-regulatorische Planungssicherheit

Damit Unternehmen wie Dillinger und Saarstahl Investitionen im Milliardenbereich tätigen können, ist eine verlässliche politisch-regulatorische Planungssicherheit notwendig. Die Errichtung von DRI-Anlagen, EAF und der zugehörigen Infrastruktur erfordert Abschreibungszeiträume von 20 bis 30 Jahren. Ohne stabile Rahmenbedingungen – etwa in

Form von klaren Definitionen, langfristig planbaren Netzentgelten, CO₂-Bepreisung und Förderinstrumenten – droht ein Investitionsstau. Zudem wird von der Politik gefordert, die Spannung zwischen globalem Wettbewerb und Klimazielen aufzulösen: Denn einerseits verlangt die EU eine schnelle Dekarbonisierung, andererseits konkurrieren europäische Produzenten mit Anbietern aus Regionen mit geringeren Energiekosten und schwächeren Klimastandards.

Instrumente wie der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) können Ansatzpunkte sein, Wettbewerbsnachteile für europäische Standorte auszugleichen. Die ökonomischen Rahmenbedingungen verdeutlichen, dass die Dekarbonisierung der Stahlindustrie nicht allein eine technologische Herausforderung ist. Vielmehr hängt ihre Realisierbarkeit entscheidend davon ab, ob es gelingt, Energiepreise zu stabilisieren, regulatorische Definitionen zu harmonisieren und internationale Transportkosten zu begrenzen. Nur wenn die politischen Leitplanken verlässlich gesetzt sind, können Investitionen der Stahlproduzenten in neue Technologien wie DRI, EAF und Wasserstoffinfrastruktur langfristig abgesichert werden.



Existierendes
Stahlwerk

Erweiterung
SekMet

EAF-Gebäude

Schlacken-
behandlung

Cold
DRI-
Lage-
rung

Schrottplatz

Entstaubung

Umbau am Standort Völklingen
Neues Anlagenkonzept

Umbau am Standort Dillingen: Neues Anlagenkonzept



6.

Literaturverzeichnis

Agora Energiewende (AI / AE 2019): *Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement*. Berlin: Agora. Online verfügbar, Stand: 25. November 2019, Zugriff am 01.09.2025. https://www.agora-industrie.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf

Agora Industry (2024): *Industrial value chain transformation – Renewable hydrogen as an enabler of a just global energy transition*. Berlin: Agora Industry. Online verfügbar, Stand: November 2023, Zugriff am 01.09.2025. https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projects/2024/2024-15_IND_H2_Value_Chain_Transformation/337_05_IND_Industrial_Value_Chain_Transformation_WEB.pdf

ArcelorMittal Germany (o. J.): *Was passiert auf der „weißen Seite“ unserer Kokerei?* Online verfügbar, Stand: unbekannt, Zugriff am 01.09.2025. <https://germany.arcelormittal.com/icc/arcelor/broker.jsp?u-Con=d2140436-a0f1-e481-0f0c-f182036eb98d&uMen=3620f6fb-ba79-9519-9f8b-4947d7b2f25d&u-Tem=aaaaaaaa-aaaa-aaaa-aaaa-000000000011>

Born, Stefan (2019): *Untersuchungen zum Verhalten und Einfluss des Einblasens von DRI und LRI in Schachttöfen*. Dissertation, Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik, RWTH Aachen University. Aachen: RWTH Aachen. Online verfügbar, Stand: 04.11.2019, Zugriff am 01.09.2025. <https://publications.rwth-aachen.de/record/805238/files/805238.pdf>

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV 2023): *ProDRI – Industrielle Produktion von direktreduziertem Eisen (DRI) auf Basis von Erdgas und/oder Wasserstoff* [Projektseite]. Online verfügbar, Zugriff am 1. September 2025. <https://www.bundesumweltministerium.de/projekt/prodri-industrielle-produktion-von-direktreduziertem-eisen-dri-auf-basis-von-erdgas-und-oder-wasserstoff>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi 2021): *Stand der Gespräche zum Handlungskonzept Stahl zwischen dem Bundeswirtschaftsministerium und der Stahlindustrie*. Berlin: Bundesregierung. Online verfügbar, Stand: 10.05.2021, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/2021-05-12-stahl-erklaerung.pdf>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi 2020): *Für eine starke Stahlindustrie in Deutschland und Europa. Handlungskonzept Stahl*. Berlin: Bundesregierung. Online verfügbar, Stand: 15.07.2020, Zugriff am 01.09.2025. https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/handlungskonzept-stahl.pdf?__blob=publication-File&v=1

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK 2024a): *Leitmärkte für*

klimafreundliche Grundstoffe. Wissenschaftliches Begleitdokument. Berlin: BMWK. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025.

https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/J-L/20240522-leitmaerkte-klimafreundliche-grundstoffe-begleitdoku-ment.html?utm_source=chatgpt.com

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK 2024b): *Leitmärkte für klimafreundliche Grundstoffe.* Online verfügbar, Stand: 31.05.2024, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/leitmaerkte-fuer-klimafreundliche-grundstoffe.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK 2024c): *Richtlinie zur Förderung von klimaneutralen Produktionsverfahren in der Industrie durch Klimaschutzverträge (Förderrichtlinie Klimaschutzverträge – FRL KSV).* Berlin: Bundesregierung. Online verfügbar, Stand: 11.03.2024, Zugriff am 01.09.2025.

<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Foerderprogramme/foerderrichtlinie-klimaschutzvertraege.pdf>

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK 2024d): *Was ist eigentlich „grüner“ Stahl?* In: Newsletter „Energiewende direkt“, Rubrik „direkt erklärt“. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025.

https://energiewende.bundeswirtschaftsministerium.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2024/05/Meldung/direkt-er-klaert.html?utm_source=chatgpt.com

chemie.de (o. J.): *Eisen.* Online verfügbar, Stand: unbekannt, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.chemie.de/lexikon/Eisen.html>

chemie-schule.de (o. J.): *Hochofen – Funktionsweise und Aufbau.* Online verfügbar, Stand: unbekannt, Zugriff am 01.09.2025. [https://www.chemie-](https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Hochofen?utm_content=cmp-true)

[schule.de/KnowHow/Hochofen?utm_content=cmp-true](https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Hochofen?utm_content=cmp-true)

chemieseiten.de (o. J.): *Grundstoffe Stahl. Arbeitsblatt „Stahlherstellung – Frischen von Roheisen“.* Online verfügbar, Stand: unbekannt, Zugriff am 01.09.2025.

https://www.chemieseiten.de/ab/kl10/AB_Grundstoffe_stahl.pdf

Comelli, Daniela; D’Orazio, Massimo; Folco, Luigi et al. (2016): The meteoritic origin of Tutankhamun’s iron dagger blade. *Meteoritics & Planetary Science*, 51(7), S. 1301–1309. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. https://web.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/iss/kap_a/articles/tuts_dagger_2016.pdf

Creos – Projektseite mosaHYc (2025): *Das Projekt mosaHYc / Häufige Fragen.*

Online verfügbar, Zugriff am: 02.09.2025: <https://www.creos-net.de/das-unternehmen/wasserstoff/leitungsprojekt-mosahyc/creos-net.de>

DACHSER SE (DACHSER 2024): *CBAM – CO₂-Grenzausgleich einfach erklärt.* Online verfügbar, Stand: unbekannt, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.dachser.de/de/cbam>

de.academic.com (o.J.): *Geschichte der Dillinger Hütte.* Online verfügbar, Zugriff am: 24.11. 2025. <https://de-academic.com/dic.nsf/dewiki/2378881>

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. / acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2024): *H₂-Kompass – Industriezweig Stahl.* Online verfügbar, Stand: März 2024, Zugriff am 01.09.2025. https://decHEMA.de/Forschung/Studien%20Bund%20Positionspapiere/2024%20B03%20H2%20Kompass/_H2K_IND_Stahl.pdf

DER SPIEGEL (1976): *Mister Midrex kommt*. Online verfügbar, Stand: 11.01.1976, Zugriff am 01.09.2025.

<https://www.spiegel.de/wirtschaft/mister-midrex-kommt-a-a0e9bb93-0002-0001-0000-000041330657>

Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband (DWW 2023): *HySteel – Eckpunktepapier der Fachkommission HySteel*. Online verfügbar, Stand: August 2023, Zugriff am 01.09.2025. <https://dww-info.de/wp-content/uploads/2023/04/20220830-HySteel-Eckpunktepapier-1-min-1.pdf>

Dillinger (o.J.): *Pressefotos*. Online verfügbar, Zugriff am 24.11.2025. <https://www.dillinger.de/aktuelles/pressefotos/>

Dourag Group (o.J.): *Lösungen für die Stahlindustrie*. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025.: [Lösungen für die Stahlindustrie | DURAG GROUP](#)

Dresler, Matthias (2020): *Verwendung einer modifizierten Kokillenoberfläche zur Vermeidung von längsrissbasierten Schalenfehlern in einer Dünnbrammengießanlage*. Doktorarbeit, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Duisburg-Essen. Online verfügbar, Stand: Juni 2020, Zugriff am 01.09.2025. https://duepublico2.uni-due.de/servlets/MCRFileNodeServlet/due-publico_derivate_00072248/Diss_Dresler.pdf

EnArgus (o. J.): *Sinteranlage – Funktionsweise und Anwendung*. Online verfügbar, Stand: unbekannt, Zugriff am 01.09.2025. https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d11585-2/*/*Sinteranlage.html?op=Wiki.getwiki

Europäische Route der Industriekultur (ERIH o. J.): *Eisen und Stahl – Wie alles begann: Geschichte ausgewählter Industriezweige*. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025.

<https://www.erih.de/wie-alles-begann/geschichte-ausgewaehlter-industriezweige/eisen-und-stahl/>

Fraunhofer-Gesellschaft (o. J.): *Einsatz von Schrott in der Stahlherstellung mindert CO₂-Ausstoß erheblich*. Online verfügbar, Zugriff am 1. September 2025.

https://www.materials.fraunhofer.de/de/Geschaeftsfelder/Energie_Umwelt/einsatz-von-schrott-in-der-stahlherstellung-mindert-co2-ausstoss.html

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (Fraunhofer IKTS 2023): *Neue Wertschöpfungsketten für die Produktion von grünem Stahl*. Online verfügbar, Stand: unbekannt, Zugriff am 01.09.2025. https://www.ikts.fraunhofer.de/de/abteilungen/umwelttechnik_verfahrenstechnik/energie_verfahrenstechnik/systemverfahrenstechnik/fa_neue_wertschoepfungsketten_fuer_dieproduktion_von_gruenem_stahl.html

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI 2023): *CO₂-neutrale Prozesswärmeerzeugung*. Karlsruhe: Fraunhofer ISI. Online verfügbar, Stand: Dezember 2023, Zugriff am 01.09.2025. C:\mnt\data\202312_Fraunhofer ISI_CO2-neutrale Prozessw%C3%A4rmeerzeugung.pdf

Geolitho Stiftung gGmbH (1999): *Mineralatlas Lexikon*. Berlin: Geolitho Stiftung. Online verfügbar. Stand: 29.09.2025, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Mineralienlexikon?lang=de>,

Germanwatch e.V. (2023): *Klimaneutrale Stahlindustrie: Rahmenbedingungen für die Transformation in Deutschland*. Hintergrundpapier. Online verfügbar, Stand: Mai 2023, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.germanwatch.org/>

[watch.org/sites/default/files/german-watch_klimaneutrale_stahlindustrie_2023.pdf](https://www.watch.org/sites/default/files/german-watch_klimaneutrale_stahlindustrie_2023.pdf)

H2-News.de (2024) – Artikel „Grüner Stahl: SHS-Gruppe schließt langfristigen Abnahmevertrag für Wasserstoff“. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/gruener-stahl-shs-gruppe-schliesst-langfristigen-abnahmevertrag-fuer-wasserstoff/> H2-news.de

Handelsblatt (HB 2024): *Stahlindustrie – Deshalb fürchten Stahlproduzenten um ihre Zukunft*. Online verfügbar, Stand: 15.03.2024, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/stahlindustrie-deshalb-fuerchten-stahlproduzenten-um-ihre-zukunft/100102283.html>

Hans-Böckler-Stiftung (2022): *H2-Transformation der Stahlindustrie und des Energieanlagenbaus (Working Paper)*. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung. Online verfügbar, Stand: 2022, Zugriff am 01.09.2025. https://www.boeckler.de/fpdf/HBS-008461/p_fofoe_WP_260_2022.pdf

Hegemann, Karl-Rudolf & Guder, Ralf (2019): *Roheisenerzeugung: Hüttenwerks- und Gasreinigungsanlagen*. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar, Stand: 13.11.2019, Zugriff am 01.09.2025. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-25406-3>

Hielscher Volker, Schwarz Kathleen, Bierwirth Kathrin, Thrun Carla, Lunau Thorsten, Feldes Werner (2026): *Auswertung der Beschäftigtenbefragung im Rahmen des Vorhabens GreenSteelSkills*. Saarbrücken (Veröffentlichung geplant).

HSM Stahl (2019): *Stahlherstellung – Technische Dokumentation TD-0020*. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025.

<https://www.hsm-stahl.de/wp-content/uploads/2024/03/TD-0020-Stahlherstellung-2019.pdf>

Industrie- und Handelskammer Saarland (IHK o. J.): *Partner der Wirtschaft – Streifzug durch die jüngere saarländische Wirtschaftsgeschichte*. Saarbrücken: IHK Saarland. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. Publikationsportal. <https://www.saarland.ihk.de>

Industriekultur (2010): Dillingen/Saar: *Jubiläum 325 Jahre Dillinger Hütte*. Online verfügbar, Stand: 25.08.2010, Zugriff am 01.09.2025. <https://industriekultur.org/2010/08/dillingen-saar-jubilaem-325-jahre-dillinger-huette/?utm=>

Informationsblätter Stahl (o. J.): *Stranggießen – Verfahren und Entwicklung*. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. <https://s1aa02f464b385b48.jimcontent.com/download/version/1585391363/month/13889140627/name/Informationsbl%C3%A4tter-Stranggie%C3%9Fen.pdf>

Informationszentrum Beton (ibau 2025): *Auf dem Weg zu klimaneutralem Stahl – Was bedeutet „grüner Stahl“?* Online verfügbar, Stand: unbekannt, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.ibau.de/akademie/wissenswertes/auf-dem-weg-zu-klimaneutralen-stahl/>

ingenieurkurse.de (o. J.): *Konverterverfahren – Erzeugung von Stahl*. Online verfügbar, Stand: unbekannt, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.ingenieurkurse.de/werkstofftechnik-2/werkstoffe-auf-eisenbasis/herstellung-von-metallen/eisen-und-stahl/erzeugung-von-stahl/konverter-verfahren.html>

Innovation Centre for Industrial Transformation (2023): *DRI/EAF implementation at Saarstahl/Dillinger steelworks (Power4Steel)*. Online verfügbar, Zugriff am

01.09.2025. <https://innovation-centre-for-industrial-transformation.ec.europa.eu/innovative-techniques/drieaf-implementation-saarstahl-dillinger-steelworks-power4steel>

Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES 2020): *Eisen- und Stahlindustrie – Förderung im Status quo* (IREES Working Paper No. 1/2020). Online verfügbar, Stand: Februar 2020, Zugriff am 01.09.2025. https://irees.de/wp-content/uploads/2020/04/2020-02-21_IREES-Working-Paper_Eisen-und-Stahlindustrie_Foerderung_Status-quo.pdf

International Energy Agency – IEA (2024): *Definitions for Near-Zero and Low-Emissions Steel and Cement, and Underlying Emissions Measurement Methodologies*. Paris: IEA. Online verfügbar (Reportseite und PDF), Zugriff am 1. September 2025. [IEAhttps://iea.blob.core.windows.net/assets/0910c4ff-4008-48f5-a3ec-c52996ed694d/Definitionsfornear-zeroand-low-emissionssteelandcementandunderlyingemissionsmeasurementmethodologies.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/0910c4ff-4008-48f5-a3ec-c52996ed694d/Definitionsfornear-zeroand-low-emissionssteelandcementandunderlyingemissionsmeasurementmethodologies.pdf)

Interstahl Stahlhandel GmbH (Interstahl 2025a): *Geschichte – Interstahl*. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.interstahl.com/wiki/geschichte/>

Interstahl GmbH (Interstahl 2025b): *Roheisenproduktion*. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.interstahl.com/wiki/roheisenproduktion/>

JFE Steel Corporation (2022): *Reduction of CO₂ Emissions from Blast Furnace with Carbon Recycling Methane*. Online verfügbar, Stand: September 2022, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/028/pdf/028-03.pdf>

Kaelin, Otto (2023): *Eisen – Geschichte, Verwendung, Gewinnung, Eigenschaften. Derendingen*. Berlin: Lernhelfer. Online verfügbar, Stand: 03.01.2023, Zugriff am

01.09.2025. <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie/artikel/eisenstahlherstellung>,

Kaminplatten-Sammlung Kremer (o. J.): *Geschichte der saarländischen Eisenwerke*. Online verfügbar, Stand: unbekannt, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.kaminplatten-sammlung-kremer.de/die-alte-sammlung-the-old-collection/geschichtliches/saarlaendische-eisenwerke/>

Karl-Rudolf Hegemann & Ralf Guder (2020): *Stahlerzeugung: Integrierte Hüttenwerks- und Gasreinigungsanlagen*. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar, Stand: August 2020, Zugriff am 01.09.2025. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-29091-7>

Kleimt, Bernd; Dettmer, Bernd; Haverkamp, Vico; Deinet, Thomas; Tassot, Patrick (2012): *Increased Energy and Material Efficiency of Steelmaking in the Electric Arc Furnace*. Online verfügbar, Stand: 30.07.2012, Zugriff am 01.09.2025. https://books.vivis.de/wp-content/uploads/2023/01/2012_RuR_367_392_Dettmer_Kleimt.pdf

koks-gas-teer.de (o. J.a): *Verfahren zur Koks-, Gas- und Teerproduktion (Detailseite „ss“)*. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. https://www.koks-gas-teer.de/verfahren_detail1.html#ss

koks-gas-teer.de (o. J.b): *Verfahren zur Koks-, Gas- und Teerproduktion – „Weiße Seite“*. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. [https://www.koks-gas-teer.de/verfahren_de-tail2.html#:~:text=Die%20Wascher%20haben%20eine%20bestimmte,\(Verfahrensweise%20bei%20einer%20Zechenkokerei\)](https://www.koks-gas-teer.de/verfahren_de-tail2.html#:~:text=Die%20Wascher%20haben%20eine%20bestimmte,(Verfahrensweise%20bei%20einer%20Zechenkokerei))

Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI 2025): *Stahlindustrie – auf dem Weg zur klimafreundli-*

chen Industrie. Online verfügbar, Stand: unbekannt, Zugriff am 01.09.2025.

<https://www.klimaschutz-industrie.de/themen/branchen/stahlindustrie/>

Lernhelfer.de (o. J.): *Eisen, Stahlherstellung*. Berlin: Lernhelfer. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie/artikel/eisen-stahlherstellung>,

Lissberg.de (o.J.): *Erzgewinnung*. Online verfügbar, Zugriff am: 01.09.2025. <https://www.lissberg.de/erzgewinnung.html>

Lüngen, Hans Bodo & Schmöle, Jörg (2022a): *MGV und klimaneutrale Stahlproduktion – Strategien zur Reduktion von CO₂ in der Stahlindustrie*. Düsseldorf: Stahlinstitut VDEh. Online verfügbar, Stand: Juni 2022, Zugriff am 01.09.2025. https://vdeh.de/media/2022-06-09_luengen_schmoele_mgv_vdeh_public_final.pdf

Lüngen, Hans Bodo; Schmöle Jörg (2022b): *History, developments and processes of direct reduction of iron ores*. Düsseldorf: Stahlinstitut VDEh. Online verfügbar, Stand: 01.09.2022, Zugriff am 01.09.2025. https://vdeh.de/media/luengen_dri_ecic_2022.pdf

Lüngen, Hans Bodo (2021): *Wege zur Minderung von CO₂-Emissionen*. Düsseldorf: Stahlinstitut VDEh. Online verfügbar, Stand: März 2021, Zugriff am 01.09.2025. https://vdeh.de/media/2021-03-30_luengen_wege_zur_minderung_von_co2-emissionen.pdf

marketSTEEL (MS 2024): *Bedeutung der Elektrolichtbogenofen-Route in der Stahlherstellung*. Online verfügbar, Stand: 29.07.2024, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.marketsteel.de/news-details/bedeutung-der-elektrolichtbogenofen-route-in-der-stahlherstellung.html>

Mensch und Bergbau e. V. (2012): *Kunst, Kultur und Tradition*. Saarbrücken: Mensch und Bergbau. Online verfügbar, Stand: 2012, Zugriff am 01.09.2025. https://delfs-lotta.de/download/themen/bergbau/2012-Mensch_und_Bergbau-Kunst_Kultur_und_Tradition.pdf,

Midrex (2021): *Direct Reduction – Technology and Outlook*. Technical Report. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Tech_Brochure_2024updates.pdf

Midrex (2020a): *Getting the Most from Direct Reduced Iron: Operational Results of Midrex Hot Transport/Hot Charging*. Online verfügbar, Zugriff am 23.09.2025. <https://www.midrex.com/tech-article/getting-the-most-from-direct-reduced-iron-operational-results-of-midrex-hot-transport-hot-charging/>

Midrex (2020b): *Hot Transport – HOTLINK*. Technische Broschüre. Online verfügbar, Zugriff am 23.09.2025. https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Hot_Transport_-_HOTLINK.pdf

Midrex Technologies, Inc. (Midrex 2018): *Hot Briquetted Iron (HBI), Steel's Most Versatile Metallic: Part 3 – Assessing Product Quality*. Online verfügbar, Stand: Dezember 2018, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.midrex.com/tech-article/hot-briquetted-iron-steels-most-versatile-metallic-part-3-assessing-product-quality/>

Mineralienatlas.de (o.J.): *Eisen*. Online verfügbar, Zugriff am: 01.09.2025. <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Mineralienportrait/Eisen>

Ministerium für Bildung und Kultur des Saarlandes (MBK o. J.a): *Weitere Denkmäler der Industriekultur im Saarland*. Saarbrücken: MBK. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.saar->

[land.de/mbk/DE/portale/industriekulturportal/industriekultur/OrtelIndustriekulturSaarland/denkmaeleranderebereiche](https://www.saarland.de/mbk/DE/portale/industriekulturportal/industriekultur/OrtelIndustriekulturSaarland/denkmaeleranderebereiche)

Ministerium für Bildung und Kultur des Saarlandes (MBK o. J.): *Altes HüttenAreal Neunkirchen – Denkmäler der Industriekultur im Saarland*. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.saarland.de/mbk/DE/portale/industriekulturportal/industriekultur/OrtelIndustriekulturSaarland/denkmaeleranderebereiche/huetten-arealneunkirchen>

MMLogistik (2024): *Arcelormittal liefert Eisenschwamm per DB-Cargo nach Eisenhüttenstadt*. Online verfügbar, Stand: 29.02.2024, Zugriff am: 01.09.2025. [Arcelormittal liefert Eisenschwamm per DB Cargo nach Eisenhüttenstadt](https://www.aarcelormittal.com/de/pressenachrichten/arcelormittal-liefert-eisenschwamm-per-db-cargo-nach-eisenhuettenstadt)

NaTran / mosaHYc – Nachricht zur Wasserstoff-Versorgung (Cross-border supply). Online verfügbar. Zugriff am 01.09.2025. <https://www.natransgroupe.com/en/mosahyc/news/mosahyc-hydrogen-supply-agreement-september-2025> [natransgroupe.com](https://www.natransgroupe.com)

Peters, M. (2016): *Stahlherstellung – Verfahren, Anlagen, Einsatzstoffe*. 3., überarbeitete Auflage. Springer Vieweg: Berlin/Heidelberg.

Preahistorische-archiologie.de (o.J.): *Die Geschichte der Eisenverhüttung*. Online verfügbar, Zugriff am: 01.09.2025. <https://www.praehistorische-archaeologie.de/wissen/die-eisenzeit/eisenverhuettung/>

Pure Steel (o. J.): *Power4Steel – Der Weg der CO₂-Transformation*. Online verfügbar, Stand: unbekannt, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.pure-steel.com/power4steel/>

R.T. Patterson Company (o. J.): *Revitalizing the Steel Industry: The Transformative Role of Electric Arc Furnaces in Sustainable*

Steelmaking. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. <https://rtpatterson.com/revitalizing-the-steel-industry-the-transformative-role-of-electric-arc-furnaces-in-sustainable-steelmaking/>

Rekersdrees, Tim; Schliephake, Henning; Schulbert, Klaus (2014): Aufbau und Prozessführung des Lichtbogenofens unter besonderer Berücksichtigung des Schlackenmanagements. *Stahl und Metall*, 114 (5), S. 209–230. Online verfügbar, Stand: Mai 2014, Zugriff am 01.09.2025. https://books.vivis.de/wp-content/uploads/2023/03/2014_SaM_209-230_Schliephake.pdf

RWTH Aachen – Circulated (RWTH CD 2025): *Eisen und Stahl*. Online verfügbar, Stand: 2025, Zugriff am 01.09.2025. https://circulated.rwth-aachen.de/index.php?title=Eisen_und_Stahl

Saarland.de (o. J.): *Förderprogramm für Wasserstoffhochlauf (Hy2Infra)*. Online verfügbar. Zugriff am 01.09.2025. https://www.saarland.de/mwide/DE/aktuelles/aktuelle-meldungen/2024/07/15_146_mio_euro_fuer_wasserstoff-hochlauf

Saar-Nostalgie (o. J.): *Hüttenwerke – Fotos*. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.saar-nostalgie.de/Huettenwerke-Fotos.htm>

Saarschmiede (2023): *Rekordergebnis: Die Dillinger Gruppe und Saarstahl Gruppe schaffen die wirtschaftliche Basis der Transformation*. Online verfügbar, Stand: 19.04.2023; Zugriff am 01.09.2025. <https://www.saarschmiede.de/aktuelles-downloads/pressemitteilungen/rekordergebnis-die-dillinger-gruppe-und-saarstahl-gruppe-schaffen-die-wirtschaftliche-basis-der-transformation/?id=7427#:~:text=Im%20Dezem->

[ber%202022%20wurden%20Investitionen%20von%20historischem,und%20die%20Gesch%C3%A4fts%C3%BCh-rung%20der%20SHS%20%E2%80%93%20Stahl%2DHolding%2DSaar](#)

Saarstahl (o.J.): *Pressefotos*. Online verfügbar, Zugriff am: 24.11.2025.

<https://www.saarstahl.com/aktuelles/pressefotos/>

Salzgitter AG (SZAG 2023): *SALCOS – Salzgitter Low CO₂ Steelmaking*. Projektinformationen.

Online verfügbar, Zugriff am: 24.11.2025:

<https://salcos.salzgitter-ag.com>

Salzgitter AG (SZAG 2020): *Die CO₂-Bilanz der Stahlbranche*. Online verfügbar, Stand: 15.09.2020, Zugriff am 01.09.2025.

https://www.salzgitter-ag.com/fileadmin/mediadb/szag/coporate_responsibility/umwelt_und_energie/studie_co2_bilanz_stahl.pdf

Salzgitter AG (SZAG o. J.): *Direktreduktionsverfahren mit Wasserstoff – Projekt μ DRAL*. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. <https://salcos.salzgitter-ag.com/de/mydral.html>

Schliephake, Thomas (2014): *Kritische Rohstoffe: Verfügbarkeit, Nutzung und Bedeutung für die Stahl- und Metallwirtschaft. Stahl und Metall*, 2014, S. 209–230. Online verfügbar, Stand: März 2014, Zugriff am 01.09.2025. https://books.vivis.de/wp-content/uploads/2023/03/2014_SaM_209-230_Schliephake.pdf

Schwingenschrot, Ferdinand (2010): *Vom Erz zum Stahl – eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Entwicklungen*. Wien: Österreichischer Stahlbauverband. Online verfügbar, Stand: Februar 2010, Zugriff am 01.09.2025. https://www.stahlbauverband.at/download/52/Vom_Erz_zum_Stahl.pdf

SHS – Stahl-Holding-Saar (SHS 2025): *Pressemitteilung: Die Transformation schreitet voran: SHS-Gruppe und Verso Energy unterschreiben wegweisenden Wasserstoff-Vertrag*. Online verfügbar, Stand: 05.09.2025, Zugriff am 01.09.2025.

https://www.stahl-holding-saar.de/shs/de/presse/pressemitteilungen/die-transformation-schreitet-voran-shs-gruppe-und-verso-energy-unterschreiben-wegweisenden-wasserstoff-vertrag-117887.shtml?utm_source=chatgpt.com und <https://www.saarstahl.com/aktuelles/pressemitteilungen/die-transformation-schreitet-voran-shs-gruppe-und-verso-energy-unterschreiben-wegweisenden-wasserstoff-vertrag/?id=19784>

SHS – Stahl-Holding-Saar (2023a): *Dekarbonisierungsfahrplan. Pressemitteilung zur Inbetriebnahme neuer EAF-Anlagen in Völklingen und Dillingen*.

SHS – Stahl-Holding-Saar (2023b): *Power4Steel – Transformationsstrategie Dillinger/Saarstahl*. Unternehmenskommunikation, Pressemitteilungen und Projektinformationen.

SHS – Stahl-Holding-Saar (SHS 2012): *Die regionalwirtschaftliche Bedeutung der Stahlindustrie für das Saarland*. Online verfügbar, Stand: 30.05.2012, Zugriff am 01.09.2025. https://www.stahl-holding-saar.de/imperia/md/content/shs/stahlstudie_2012.pdf

Stadt Dillingen/Saar (o. J.): *Historie – Dillingen/Saar*. Online verfügbar, Stand: unbekannt, Zugriff am 01.09.2025.

<https://www.dillingen-saar.de/rathaus/dillinger-steckbrief/geschichte/?utm=>

Stahlinstitut VDEh (2025a): *Umformtechnik*. Online verfügbar, Stand: 25.09.2025, Zugriff am 01.09.2025. <https://vdeh.de/derwerkstoff/stahlherstellung/umformtechnik/>

Stahlinstitut VDEh (2025b): *Wasserstoffbasierte Stahlerzeugung*. Online verfügbar, Stand: 29.09.2025, Zugriff am 01.09.2025.

<https://vdeh.de/der-werkstoff/stahlherstellung/wasserstoffbasierte-stahlerzeugung/>

Stahl-online.de (o.J.): *Geschichte der Eishütten- und Eisenhüttentechnik*. Online verfügbar, Zugriff am: 01.09.2025: [geschichte-eisenhuetten-technik_v1.pdf](https://www.stahl-online.de/geschichte-eisenhuetten-technik-v1.pdf)

tec-science (2018): *Hochofenprozess – Funktion und Ablauf der Roheisenerzeugung*. Online verfügbar, Stand: 21.06.2018, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/stahl-erzeugung-herstellung/hochofen-prozess/>

thyssenkrupp Schulte (o. J.): *Was bedeutet „grüner Stahl“? – Definition, Herstellung & Perspektiven*. Essen: thyssenkrupp Schulte GmbH. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.thyssenkrupp-schulte.de/de/das-bewegt/nachhaltigkeit/gruener-stahl>

thyssenkrupp Steel Europe AG (tkSE 2023): Broschüre „Dialogmarkt“ November 2023 – Errichtung und Betrieb einer Direktreduktionsanlage mit Einschmelzern. Duisburg: thyssenkrupp. Online verfügbar, Stand: November 2023, Zugriff am 01.09.2025. https://transformation.thyssenkrupp-steel.com/media/dr_anlage_1/info-thek/nov_23/231103_thyssenkrupp_broschuere_dialogmarkt_nov23_steel.pdf

Umweltbundesamt (UBA 2025): *Treibhausgas-minderungsziele Deutschlands*. Dessau-Roßlau: UBA. Online verfügbar, Zugriff am 1. September 2025. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-minderungsziele-deutschlands>

Umweltbundesamt (UBA 2024): *Treibhausgas-minderungsziele Deutschlands*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025.

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-minderungsziele-deutschlands>

Umweltbundesamt (UBA 2023): *Der EU-Emissionshandel wird umfassend reformiert*. Online verfügbar, Stand: 06.07.2023, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/der-eu-emissions-handel-wird-umfassend-reformiert>

Umweltbundesamt (UBA-AT 1998): *Behandlung von Reststoffen und Abfällen in der Eisen- und Stahlindustrie (Monographien M-092)*. Wien: Umweltbundesamt. Online verfügbar, Stand: 1998, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/M092.pdf>

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC 2018): *The Paris Agreement*. Online verfügbar, Stand: 29.11.2018, Zugriff am 01.09.2025. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf

Vattenfall (2021): *Weltweit erster wasserstoffreduzierter Eisenschwamm – HYBRIT-Pilotprojekt in Luleå*. Online verfügbar, Stand: 23.06.2021, Zugriff am 01.09.2025. <https://group.vattenfall.com/de/news-room/news/2021/hybrit-erster-wasserstoff-reduzierter-eisenschwamm>

VDI nachrichten (o. J.): *Direktreduktion: Diese Technik wird den Hochofen beerben*. Online verfügbar, Zugriff am 1. September 2025. <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/werkstoffe/direktreduktion-diese-technik-wird-den-hochofen-beerben/>

VDI Nachrichten (2022): *Direktreduktion: Diese Technik wird den Hochofen beerben*. Online verfügbar, Stand: 07.04.2022, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/werkstoffe/direktreduktion-diese-technik-wird-den-hochofen-beerben/>

VDMA (2020): *Praxisleitfaden Inbetriebnahme und Testläufe von Industrieanlagen*. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, Frankfurt am Main.

Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh 2007): *Geschichte der Eisenhüttentechnik. Themenpapier*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. https://vdeh.de/media/geschichte_eisenhuettentechnik_v1.pdf

Verso Energy / SHS – Pressemitteilung: *The transformation takes another step forward – SHS Group and Verso sign groundbreaking hydrogen contract* Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. https://verso.energy/wp-content/uploads/2025/09/2025_09_05_PR_PRESS-EMBARGO-NOTICE-11h45-The-transformation-takes-another-step-forward_SHS-and-Verso-sign-groundbreaking-hydrogen-contract.pdf Verso Energy

voestalpine AG (2023): *Lichtbögen in grüne Zeiten*. Online verfügbar, Stand: 22. Mai 2023, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.voestalpine.com/blog/de/nachhaltigkeit/greentec-steel/lichtboegen-in-gruene-zeiten/>

Weltkulturerbe Völklinger Hütte (WVH o.J.): *Pressefotos*. Online verfügbar, Zugriff am 24.11. 2025. [Pressefotos Weltkulturerbe Völklinger Hütte – Presse – Weltkulturerbe Völklinger Hütte](#)

Westfalenpost (2023): *Seltene Bessemer-Birne soll nach Lendringsen zurückkehren*. Online verfügbar unter: <https://www.wp.de/staedte/menden/article238989505/Seltene-Bessemer-Birne-soll-nach-Lendringsen-zurueckkehren.html> Stand: 20.07.2023, Zugriff am 01.09.2025

Wikipedia (2025a): *Europäisches CO₂-Grenzausgleichssystem*. Online verfügbar, Stand: 26.09.2025, Zugriff am 01.09.2025.

https://de.wikipedia.org/wiki/Europ%C3%A4isches_CO2-Grenzausgleichssystem

Wikipedia (Wikipedia 2025b): *Weitere Denkmäler der Industriekultur im Saarland*. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. https://de.wikipedia.org/wiki/Denkm%C3%A4ler_der_Industriekultur_im_Saarland

Wikipedia (2024): *Geschichte der Dillinger Hütte*. Online verfügbar, Stand: 03.02.2024, Zugriff am 01.09.2025. https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Dillinger_H%C3%BCtte?utm

Wikipedia (2012): *Hochofen*. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. <https://de.wikipedia.org/wiki/Hochofen>

Wirtschaftsvereinigung Stahl (WV Stahl 2025): *Wasserstoff – Chancen, Anwendungen und Herausforderungen in der Stahlindustrie*. Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025. <https://www.wvstahl.de/energie-und-klimapolitik/wasserstoff/>

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024): *Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland (Ausgabe 2024)*. Berlin: WV Stahl. Online verfügbar (Broschürenseite und PDF), Zugriff am 1. September 2025. [WV-Stahl Daten-und-Fakten-2024 RZ-Web.pdf](#)

Wirtschaftsvereinigung Stahl (WV Stahl 2023): *Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland*. Online verfügbar, Stand: Dezember 2023, Zugriff am 01.09.2025. https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Fakten-2023_Web.pdf

Wirtschaftsvereinigung Stahl (WV Stahl 2022): *Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland*. Online verfügbar, Stand: 05. Dezember 2022, Zugriff am 01.09.2025. https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Fakten-2022_RZ_neu_Web.pdf

World Steel Association (2020): *Fact sheet: Hydrogen in steel production*. Brüssel.
Online verfügbar, Zugriff am 01.09.2025.
<https://worldsteel.org/wp-content/uploads/fact-sheet-hydrogen-in-steel-production.pdf>

Wuppermann, H. (2021): *Technik der Direktreduktion und Elektrolichtbogenöfen – Chancen für die CO₂-arme Stahlproduktion*. Vortrag, TU Clausthal, 2021.

ZDFheute (ZDF 2024): *Stahlindustrie: Grüner Stahl als Zukunftsgarant?* Online verfügbar, Stand: 11.10.2024, Zugriff am 01.09.2025. https://www.zdfheute.de/wirtschaft/unternehmen/saarland-stahlindustrie-gruener-stahl-100.html?utm_source=chatgpt.com

