Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences

Wirtschaftswissenschaftliche Schriften

Szenarien für den Stahlschrottbedarf der deutschen Stahlindustrie

Maik Hartung

Frank Pothen

Carolin Hundt

Heft 02 / 2025

Department for Business Administration
Fachbereich Betriebswirtschaft

Szenarien für den Stahlschrottbedarf der deutschen Stahlindustrie

Maik Hartung

Frank Pothen

Carolin Hundt

Verlag Ernst-Abbe-Hochschule Jena | 2025

Reihe: **Wirtschaftswissenschaftliche Schriften**
Jahrgang 2025, Heft 02

Herausgeber: Prof. Dr. Frank Pothen

Redaktion: Prof. Dr. Frank Pothen

ISSN 1868-1689 eISSN (PDF) 1868-1697

ISBN 978-3-932886-50-8 eISBN (PDF) 978-3-932886-51-5

© 2025 Verlag Ernst-Abbe-Hochschule Jena
Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

Ernst-Abbe-Hochschule Jena, University of Applied Sciences
Fachbereich Betriebswirtschaft
Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena
Tel.: 03641-205-550

Die vorliegende Publikation wurde mit größter Sorgfalt erstellt, Verfasser und Herausgeber können für den Inhalt jedoch keine Gewähr übernehmen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung und Einspeicherung in elektronische Systeme des gesamten Werkes oder Teilen daraus bedarf – auch für Unterrichtszwecke – der vorherigen Zustimmung der Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Fachbereich Betriebswirtschaft und der Autor:innen.

Printed in Germany

Wirtschaftswissenschaftliche Schriften Heft 02/2025

Szenarien für den Stahlschrottbedarf der deutschen Stahlindustrie

Maik Hartung, Frank Pothen, Carolin Hundt

Zusammenfassung

Der Einsatz von Stahlschrott als Rohstoff der Stahlherstellung vermeidet Treibhausgasemissionen (THG) in erheblichem Umfang. Ambitionierte Klimaziele lassen somit einen steigenden Bedarf an Stahlschrott erwarten.

Diese Studie quantifiziert plausible Bandbreiten für den Stahlschrottbedarf der deutschen Stahlindustrie bis 2045 als Zieljahr der angestrebten Klimaneutralität. Der Bedarf wird maßgeblich durch die Rohstahlproduktion, die Zusammensetzung der Verfahrensrouten sowie deren Schrotteinsatzquoten bestimmt. Um den erheblichen Unsicherheiten bei der Entwicklung dieser Faktoren Rechnung zu tragen, werden Szenarien entwickelt. Die Annahmen hinter diesen Szenarien basieren auf der Auswertung von Transformationsstudien und Trends sowie ergänzenden Annahmen. Der mögliche Stahlschrottbedarf wird für die Stichjahre 2030 und 2045 abgeleitet.

Die Szenarien suggerieren, dass die Bandbreite des Stahlschrottbedarfs im Jahr 2030 zwischen 17,0 Mio. t und 22,7 Mio. t liegt. 2045 liegt sie zwischen 14,9 Mio. t und 27,6 Mio. t. Zum Vergleich: von 2015 bis 2023 wurden in Deutschland durchschnittlich 17,2 Mio. t Stahlschrott pro Jahr eingesetzt. Der Bedarf an hochwertigem, wenig verunreinigten Schrott für die Primärproduktion von Stahl liegt 2030 zwischen 4,3 Mio. t und 7,7 Mio. t und 2045 zwischen 2,7 Mio. t und 10,1 Mio. t. Von 2015 bis 2023 wurden durchschnittlich 4,8 Mio. t Schrott in der Hochofenroute eingesetzt.

Diese Ergebnisse deuten auf einen steigenden Stahlschrottbedarf in Deutschland hin. Knappheit ist primär bei hochwertigem Schrott zu erwarten, sowohl durch einen steigenden Bedarf als auch durch eine fallende Verfügbarkeit. Technischer Fortschritt bei der Sammlung, Sortierung und Aufbereitung von Stahlschrott sowie Importe von hochwertigem Schrott könnten diese (mögliche) Knappheit reduzieren. Die tatsächliche Stahlschrottnachfrage und -knappheit wird ein Marktergebnis sein.

Schlagwörter: Stahlrecycling; Stahlschrott; Szenarien; Kreislaufwirtschaft; Klimaneutralität

E-Mail: maik_hartung@web.de, frank.pothen@eah-jena.de, carolin.hundt@eah-jena.de

1 Einleitung

Die deutsche Bundesregierung wie auch die Europäische Union haben sich zum Ziel gesetzt, bis Mitte des Jahrhunderts die Klimaneutralität zu erreichen. Während die EU dieses Ziel für 2050 anstrebt, soll Deutschland bereits 2045 klimaneutral werden. Die deutsche Stahlindustrie mit ihren rund 80 000 Beschäftigten verfolgt ebenfalls das Ziel, ihre Produkte bis 2045 klimaneutral herzustellen. Damit würde sie etwa 51 Mio. t CO_2 einsparen (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2023a). Dies entspricht etwa einem Drittel der industriellen Treibhausgasemissionen in Deutschland (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2024a).

Jede wieder eingeschmolzene Tonne Stahlschrott vermeidet etwa 1,66 t CO_2 (World Steel Association, 2021). Allerdings beschränkt sowohl die quantitative als auch die qualitative Verfügbarkeit den Schrotteinsatz (Pauliuk et al., 2013). Diese unterscheidet sich wiederum regional: entwickelten Volkswirtschaften steht typischerweise mehr Stahlschrott zur Verfügung als Entwicklungs- und Schwellenländern (Hundt und Pothen, 2025; Watari und Yokoi, 2021). Dies ist auf die über einen langen Zeitraum akkumulierten Stahlmengen im anthropogenen Lager zurückzuführen: In entwickelten Volkswirtschaften sind größere Stahlmengen in Gebäuden, Produkten und Infrastruktur gebunden, die dem Recycling potenziell zur Verfügung stehen.

Im Jahr 2023 wurden 72,3 % des in Deutschland gefertigten Stahls in der treibhausgasintensiven Hochofen-Konverter-Route (auch Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace oder BF-BOF-Route) produziert. Die verbleibenden 27,7 % stammen aus der klimafreundlicheren Elektrolichtbogenroute (auch Electric Arc Furnace oder EAF-Route). Zum Vergleich: In der EU liegen diese Anteile bei 55,2 % und 44,8 % (World Steel Association, 2024). Die Routen unterscheiden sich in der Möglichkeit, Schrott als Rohstoff zu verwenden, voneinander. Während die EAF-Route mit Schrott als (quasi) einzigem Rohstoff arbeiten kann, liegt der Schotteinsatz in der BF-BOF-Route typischerweise bei unter 20 %.

Um ambitionierte Klimaziele zu erreichen, muss die treibhausgasintensive BF-BOF-Route durch klimaneutrale Produktionsverfahren ersetzt werden. Drei Optionen stehen dabei im Mittelpunkt: die wasserstoffbasierte Eisenerzdirektreduktion, die Abscheidung und Speicherung oder Nutzung von CO_2 sowie ein verstärkter Einsatz von Stahlschrott (Lüngen, 2021). Diese Optionen schließen sich nicht gegenseitig aus: die wasserstoffbasierte Stahlproduktion kann zum Beispiel mit mehr Schrotteinsatz kombiniert werden. Vor dem Hintergrund endlicher Schrottverfügbarkeit stellen sich jedoch zwei Fragen: Welcher Bedarf an Stahlschrott ist in der deutschen Stahlindustrie zu erwarten? Und erscheint in

Zukunft eine Knappheit an Stahlschrott plausibel?

Diese Studie quantifiziert eine plausible Bandbreite für den Stahlschrottbedarf der deutschen Stahlindustrie bis 2045. Dieser hängt von der Rohstahlproduktion, der Zusammensetzung der Verfahrensrouten sowie den Schrotteinsatzquoten (SEQ) in diesen Routen ab. Der Schrottbedarf wird für die Stichjahre 2030 und 2045 untersucht. Der Bedarf an hochwertigem Schrott für anspruchsvolle Stähle wird gesondert approximiert. Hierbei wird auf einen einfachen und transparenten Ansatz zurückgegriffen.

Um den Unsicherheiten bei der Entwicklung der Einflussfaktoren für den Stahlschrottbedarf Rechnung zu tragen, verfolgen wir einen szenariobasierten Ansatz. Szenarien können den Blick für längerfristige Chancen und Risiken öffnen und ermöglichen eine faktenbasierte Einschätzung zukünftiger Entwicklungen (Meinert und Stollt, o.J.). Aus Szenarien können wissenschaftliche und praktische Implikationen abgeleitet werden. Die in diesem Papier entwickelten Szenarien basieren auf einer Analyse aktueller Studien zur Transformation der Stahlindustrie, der Auswertung von Trends der letzten Jahre sowie Annahmen über Schrotteinsatzquoten in neuen, wasserstoffbasierten Produktionsverfahren. Daraus entwickeln wir neun Szenarien, die eine Bandbreite plausibler Entwicklungen in der Stahlindustrie abbilden, und leiten die mit ihnen verbundenen Schrottbedarfe ab. Dabei gilt zu bedenken: In der Praxis ist der Schrotteinsatz in der Stahlproduktion ein Marktergebnis: Preise, Verfügbarkeit und Qualität von Schrott sowie Eisenschwamm (Direct Reduced Iron, DRI) werden die tatsächliche Nachfrage bestimmen.

Unsere Studie leistet drei wesentliche Beiträge. Erstens ergänzt sie die zahlreichen Studien zur Transformation der (deutschen) Stahlindustrie zur Klimaneutralität um die Dimension des Schrottbedarfs. Zweitens bildet sie das Gegenstück zu Studien, welche die Verfügbarkeit von Stahlschrott quantifizieren (z.B. Hundt und Pothen, 2025; Oda et al., 2013; Dworak et al., 2022). Drittens unterstützt unsere Studie Entscheidungsträger in Stahlindustrie, Stahlrecyclingwirtschaft und Politik bei ihrer Zukunftsplanung. Die einfachen und transparenten Szenarien skizzieren eine plausible Bandbreite des Schrottbedarfs. Unser Ansatz kann analog auf andere recycelte Rohstoffe übertragen werden.

Die Studie ist wie folgt strukturiert. Kapitel 2 vermittelt Hintergründe zu Stahl, Stahlproduktion und Stahlrecycling. In Kapitel 3 werden aktuelle Studien zur Transformation der Stahlindustrie sowie Trends ihrer Entwicklung dargestellt. Kapitel 4 präsentiert die Szenarien und die mit ihnen verbundenen Stahlschrottbedarfe. Kapitel 5 zieht ein Fazit.

2 Hintergründe

2.1 Begriffsbestimmungen

Bei Stahl handelt es sich um eine Eisen-Kohlenstoff-Legierung, deren Massenanteil an Eisen höher ist als der jedes anderen Elements und die grundsätzlich einen Kohlenstoffanteil von weniger als 2 % aufweist (DIN EN 10020: 2000-07, 2000). Bei Roheisen handelt es sich um ein Zwischenprodukt der Stahlherstellung. Es enthält neben Eisen im Mittel etwa 4 % Kohlenstoff, 0,05 % Schwefel und kann auch andere Elemente innerhalb gewisser Grenzen enthalten. Wenn einer dieser Grenzwerte überschritten wird, gelangt man in den Bereich der Ferrolegierungen (DIN EN 10001: 1991-03, 1991). Ein weiteres Zwischenprodukt auf dem Weg zum Stahl ist Eisenschwamm (Direct Reduced Iron, DRI). Er entsteht in Direktinduktionsanlagen, fällt aber als Feststoff an (Küster Simic und Schönfeldt, 2022).

Stahlschrott ist ein Sekundärrohstoff oder recycelter Rohstoff. Er fällt in der Rohstahlproduktion (Kreislaufschrott), in der Verarbeitung von Stahl zu Zwischen- und Endprodukten (Neuschrott) und am Ende des Lebenszyklus von Produkten aus Stahl (Altschrott) an. Stahlschrott kann nach Sorten kategorisiert werden (BVSE, o.J.; BDSV, 1995, 2010). In der Europäischen Stahlschrottsortenliste bezeichnen die Sorten E2, E6 und E8 besonders hochwertigen Neuschrott, die Sorten E3 und E1 Altschrott. Die Sorte E40 umfasst Schredderschrott, E5 Späne (Neuschrott). Weitere Sorten umfassen spezielle Arten von Altschrott wie Weißblech. Für die Qualität von Schrott sind sowohl die metallurgischen (chemische Zusammensetzung) als auch die technischen Eigenschaften (Schüttgewicht, Dämpfungswirkung, Rieselfähigkeit, Aufschmelzverhalten) von Bedeutung. Die statistischen Daten zum Stahlschrotteinsatz beinhalten allerdings keine Informationen zu Handel und Einsatz von einzelnen Sorten. Daher nutzen wir eine Approximation des Begriffs hochwertiger Schrott, der sich an den metallurgischen Eigenschaften orientiert.

Schrott mit bekannter Zusammensetzung und wenigen Kontaminationen ist vielseitiger einsetzbar und daher stärker nachgefragt. Die Kontaminationen können verschiedenster Art sein. So sind Kupferrückstände durch ungenügende Produkt- und Materialtrennbarkeit ein zunehmendes Problem für den Materialkreislauf (Panasiuk et al., 2022; Cooper et al., 2020). Daneben gibt es Kontaminationen mit anderen (Legierungs-)Elementen oder organische Anhaftungen, was eine allgemeingültige Klassifikation von (Alt-)Schrottsorten nach Reinheitsgrad zu einer komplexen Aufgabe macht.

2.2 Verfahrensrouten der Rohstahlproduktion

2.2.1 Hochofenroute

Stahl wird in Deutschland und weltweit derzeit überwiegend über die BF-BOF-Route produziert (World Steel Association, 2024). Im Hochofen (Blast Furnace) wird Eisenerz mit Hilfe von Koks als Reduktionsmittel unter großer Hitze zu flüssigem Roheisen reduziert. In einem zweiten Verfahrensschritt wird das flüssige Roheisen im Konverter (Basic Oxygen Furnace) unter Zugabe von Sauerstoff und Stahlschrott in Rohstahl umgewandelt. Die Produktionsverfahren ähneln einander an den Produktionsstandorten (Prognos und Wuppertal Institut, 2022).

Bei der Stahlproduktion in der BF-BOF-Route spricht man auch von der Primärproduktion, da Stahl in erster Linie aus Eisenerzen hergestellt wird. Allerdings wird in der Hochofenroute auch Stahlschrott als Rohstoff eingesetzt. Er dient insbesondere als Kühlschrott im Konverter. Die Schrotteinsatzquote in der BF-BOF-Route liegt bei etwas weniger als 20 % (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2024b), d.h. Stahlschrott macht etwa ein Fünftel der Rohstoffbasis aus. Thermodynamisch ist eine Schrotteinsatzquote von bis zu 30 % möglich (DERA, 2024).

Die Rohstahlproduktion in der BF-BOF-Route ermöglicht die Produktion qualitativ hochwertiger Stähle. Jedoch gehen mit der Verwendung von Kohle bzw. Koks hohe THG-Emissionen einher (Küster Simic und Schönfeldt, 2022). Die BF-BOF-Route ist in Deutschland für ca. 95 % der Gesamtemissionen in der Stahlindustrie verantwortlich (Caviezel et al., 2024).

Die BF-BOF-Route kann um Anlagen zur CO_2-Abscheidung erweitert werden, ohne dass sich die Prozesse grundlegend verändern (Caviezel et al., 2024). Je nach weiterer Verwendung des abgeschiedenen Kohlendioxids wird zwischen Carbon Capture and Utilization (CCU) und Carbon Capture and Storage (CCS) unterschieden. Beim CCU wird das abgeschiedene CO_2 weiterverwendet, z.B. in der chemischen Industrie zur Produktion von Methanol. Beim CCS wird das Kohlendioxid in tiefliegenden geologischen Gesteinsschichten gespeichert. Der Anteil der CO_2-Emissionen, der technisch mittels Carbon Capture abgeschieden werden kann, liegt oberhalb von 90 %. Die Kosten hängen vom angestrebten Anteil und der Zusammensetzung der Gase ab (Brandl et al., 2021).

2.2.2 Elektrolichtbogenroute

Die zweitwichtigste Verfahrensroute zur Stahlherstellung in Deutschland ist die Elektrolichtbogenroute. Deren Energiebedarf wird primär aus Strom gedeckt. Daneben kommen fossile Energieträger (z.B. Erdgas) als Energielieferant und zum Einstellen des Kohlenstoffanteils im Stahl zum Einsatz (Caviezel et al., 2024).

In Elektrolichtbogenöfen wird in erster Linie aufbereiteter Stahlschrott aufgeschmolzen. Sie können grundsätzlich vollständig mit Schrott als Rohstoff arbeiten. Neben Schrott können DRI, flüssiges oder festes Roheisen sowie Legierungselemente eingebracht werden.

Grundsätzlich kann in der EAF-Route jede Stahlsorte erzeugt werden. Entscheidend für die Qualität des Endprodukts ist die Qualität des eingesetzten Schrotts. Qualitativ hochwertiger Schrott – d.h. Neuschrott mit bekannter Zusammensetzung oder aufbereiteter, kontaminationsfreier Altschrott – ist nur in begrenztem Maße vorhanden (Küster Simic et al., 2020). Durch die Verdünnung der Stahlschrottschmelze mit DRI oder Roheisen, die keine oder nur sehr geringe Mengen an Fremdmetallen enthalten, kann die gewünschte Qualität erreicht werden (Prognos und Wuppertal Institut, 2022).

Die EAF-Route ist für 1,6 % der Emissionen der deutschen Stahlindustrie verantwortlich. Hierin sind allerdings keine THG-Emissionen aus Fremdstrombezug eingerechnet (Caviezel et al., 2024). Da die Produktion im EAF strombasiert ist, wäre bei vollständiger Nutzung von erneuerbarem Strom eine nahezu emissionsfreie Stahlerzeugung möglich (Küster Simic et al., 2020).

2.2.3 Direktreduktionsverfahren

Direktreduktionsverfahren sind eine weitere Option zur Produktion von Stahl aus Eisenerz. Das Erz wird in einem Direktreduktionsofen zu festem DRI reduziert (Prognos und Wuppertal Institut, 2022). Es können Erdgas (CH_4-DR-Route) oder Wasserstoff (H_2-DR-Route) als Reduktionsmittel dienen (Stahlinstitut VDEh, o.J.). Direktreduktionsverfahren arbeiten bei niedrigeren Temperaturen als ein Hochofen. Dem Erz wird Sauerstoff entzogen, es gibt jedoch keine Schmelz- und Schlackenphase (Stahlinstitut VDEh, o.J.). DRI kann einerseits im EAF (DR-EAF-Route) und andererseits im Einschmelzer (Submerged Arc Furnace, SAF) und BOF (DR-SAF-BOF-Route) weiterverarbeitet werden (Prognos und Wuppertal Institut, 2022).

In der DR-EAF-Route wird DRI gemeinsam mit einem Stahlschrottanteil im EAF aufgeschmolzen und zu Rohstahl weiterverarbeitet. Problematisch ist hier das Abtrennen

der im DRI enthaltenen Gangart (Gestein, das kein Metall enthält) über die Schlacke (Caviezel et al., 2024). Deshalb sind hochwertige gangartarme Erze notwendig (Wuppertal Institut und IW, 2023), die nur begrenzt verfügbar sind (Doyle und Voet, 2021). Darüber hinaus ist der Durchsatz eines EAF geringer als der eines Konverters, was Anpassungen in den nachfolgenden Produktionsprozessen (z.B. im Walzwerk) nach sich ziehen kann. Vorteilhaft ist der flexiblere Schrotteinsatz (Prognos et al., 2021). Das Verfahren ist jedoch mit einem hohen Energiebedarf verbunden. Kommt heißes DRI zum Einsatz, sinkt der Energiebedarf und entspricht in etwa dem der konventionellen EAF-Route (Prognos und Wuppertal Institut, 2022).

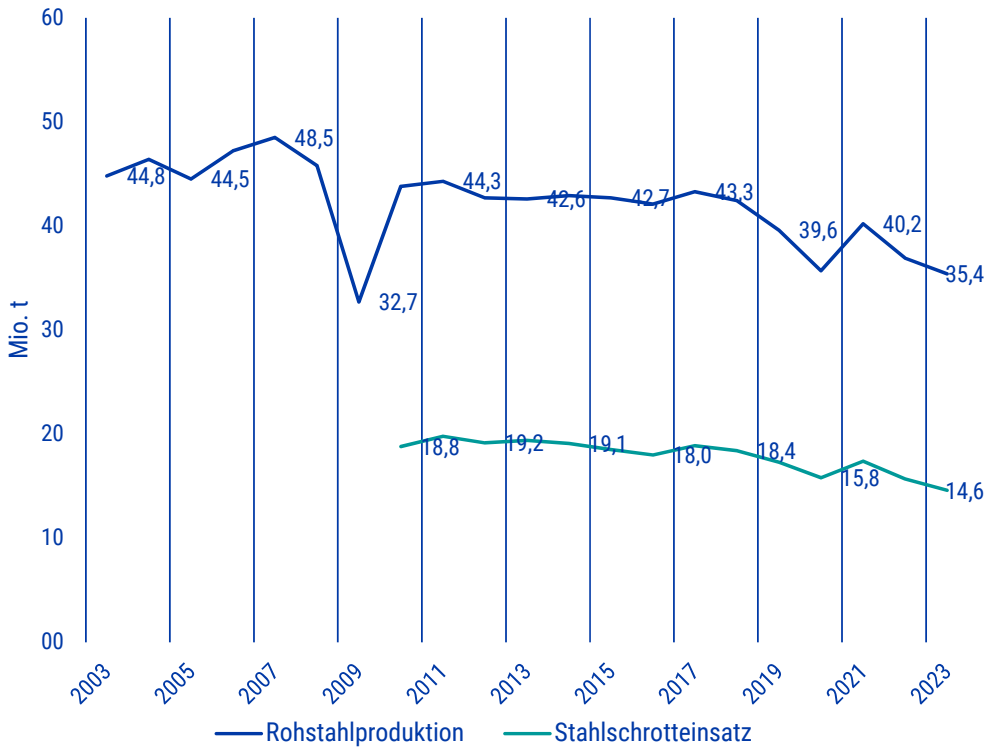
In der DR-SAF-BOF-Route wird das DRI zunächst im SAF verflüssigt und von der Gangart befreit. Es handelt sich dabei um einen Schmelz-Reduktionsofen, eine Sonderform des elektrischen Lichtbogenofens. Im BOF wird das flüssige Roheisen analog zur BF-BOF-Route zu Stahl weiterverarbeitet. Im SAF kann gangartreicheres DRI verarbeitet werden. Dadurch sind die Anforderungen an die Qualität des Eisenerzes geringer (Caviezel et al., 2024). Auch ist es möglich, den SAF auf die Stoffflüsse des vormaligen Hochofens anzupassen. So sind langlebige BOF-Anlagen und nachfolgende Aggregate weiterhin nutzbar. Darüber hinaus ist auch der Strombedarf gegenüber der Weiterverarbeitung im EAF geringer (Prognos et al., 2021).

Die DR-Route findet im industriellen Maßstab in Deutschland bisher nur bei ArcelorMittal in Hamburg Anwendung. Eine industrielle Reife von wasserstoffbetriebenen Direktreduktionsöfen kann vor 2030 erwartet werden (Caviezel et al., 2024). Die CH_4-DR-Route ermöglicht gegenüber der BF-BOF-Route eine Emissionsreduktion von ca. 66 % (Prognos et al., 2021). Wird Grüner Wasserstoff verwendet, ist in der H_2-DR-Route eine Emissionsreduktion von ca. 95 % möglich (Wuppertal Institut und Fraunhofer ISI, 2024).

2.3 Bedeutung von Stahlschrott

Abbildung 1 zeigt den Stahlschrotteinsatz der deutschen Stahlindustrie von 2015 bis 2023. Zur Einordnung wird auch die Rohstahlproduktion in Deutschland dargestellt. In diesem Zeitraum wurden jährlich durchschnittlich 17,2 Mio. t Stahlschrott eingesetzt. Das entspricht einer durchschnittlichen Schrotteinsatzquote (SEQ) von 43,1 %. Der Schrotteinsatz schwankte in diesem Zeitraum zwischen 14,6 Mio. t und 18,9 Mio. t. Diese Zahlen umfassen den gesamten Schrotteinsatz der Stahlindustrie. Eine Unterscheidung zwischen Kreislauf-, Neu- und Altschrott ist aufgrund fehlender Daten nicht möglich.

Abbildung 1
Historische Entwicklung Stahlschrotteinsatz und Rohstahlproduktion



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Wirtschaftsvereinigung Stahl (2017, 2021, 2022, 2023a,b, 2024a); Bureau of International Recycling (2014).

Der Einsatz von Stahlschrott trägt zum Klimaschutz bei. Die Produktion einer Tonne Rohstahl mit Stahlschrott in der EAF-Route senkt den Energieverbrauch gegenüber der BF-BOF-Route um 72 % (Hiebel und Nühlen, 2016). Jede wieder eingeschmolzene Tonne Stahlschrott vermeidet ca. 1,66 t CO_2 (World Steel Association, 2021). Bei rostfreiem Edelstahl spart eine Mischung (Blend) von recyceltem Edelstahlschrott 6,7 t CO_2 gegenüber einem Rohstoffmix auf Basis von Ferrolegierungen (Maga et al., 2022).

3 Auswertung aktueller Szenariostudien

3.1 Herangehensweise

Die mit dem Schrotteinsatz verbundenen CO_2-Einsparungen lassen vermuten, dass ambitionierte Klimapolitik den Bedarf an Stahlschrott steigen lässt. Allerdings sind die benötigten Mengen, insbesondere von hochwertigem Schrott, nicht verlässlich zu prognostizieren. Darum entwickelt und analysiert diese Studie Szenarien, um Bandbreiten des

Stahlschrottbedarfs zu ermitteln.

Szenarien sind konsistente und schlüssige Bilder der Zukunft und beruhen auf hypothetischen Sequenzen von Ereignissen (Günther, 2018). Sie behandeln Unsicherheiten, indem sie mögliche Veränderungen und die damit verbundenen Herausforderungen durchspielen (Meinert und Stollt, o.J.). Sie haben nicht den Anspruch, die Zukunft vorherzusagen. Allein der Umstand, dass es zu einer Fragestellung immer mehrere plausible Szenarien gibt, unterscheidet sie von Prognosen. Dennoch tragen Szenarien, die einen Eindruck von möglichen Entwicklungen vermitteln, zur informierten Entscheidungsfindung bei.

Gleichung (1) zeigt das Zusammenspiel der wesentlichen Einflussfaktoren, die den Stahlschrottbedarf B in einem Land bestimmen. Die dahinterliegenden wirtschaftlichen Determinanten (z.B. Energie- oder Rohstoffpreise) bleiben hierbei außen vor. Dadurch kann die Bandbreite des plausiblen Stahlschrottbedarfs quantifiziert werden, ohne das Zusammenspiel von Angebot, Nachfrage und Preis explizit modellieren zu müssen.

B hängt erstens von der Rohstahlproduktion Q ab. Je größer Q, desto größer ist die benötigte Schrottmenge. Zweitens hängt der Stahlschrottbedarf vom Anteil der Verfahrensroute i in der Gesamtproduktion ab. Dieser Anteil wird mit α_i bezeichnet. B hängt drittens von der Schrotteinsatzquote SEQ_i der Verfahrensroute i ab. Im Folgenden werden vier Verfahrensrouten unterschieden: die BF-BOF-Route, die EAF-Route, die DR-EAF-Route und die DR-SAF-BOF-Route.

$$B = \sum_i Q \cdot \alpha_i \cdot SEQ_i \tag{1}$$

Als Basis für unsere Szenarien dient eine Analyse aktueller Studien zur Transformation der deutschen Stahlindustrie zur Klimaneutralität, die Auswertung von Trends sowie ergänzende Annahmen. Diese werden mit Transformationsplänen der Stahlproduzenten für die Klimaneutralität abgeglichen. Dabei gilt zu beachten, dass sich die tatsächliche Transformation - gerade in ihrer Geschwindigkeit - von den Planungen unterscheiden kann. Energiepreise können beispielsweise einen großen Einfluss auf die Entwicklung der klimaneutralen Stahlproduktion ausüben. Die Analyse der Transformationspläne dient nichtsdestoweniger als Gegenprüfung für die Plausibilität der Szenarien. Die Arbeit stützt sich auf Studien, die seit 2021 erschienen sind. Diese berücksichtigen zumindest teilweise bereits die russische Invasion in die Ukraine und die dadurch veränderte Situation auf dem Energiemarkt.

Tabelle 1 zeigt die ausgewerteten Studien. In den folgenden Absätzen werden die An-

Tabelle 1
Übersicht der ausgewerteten Studien mit Szenariennamen

Szenario	Quelle
Transformationspfad	Boston Consulting Group und IW (2024)
S4C-KN	Wuppertal Institut und IW (2023)
Langfristszenarien	Consentec et al. (2021)
OptiKLIND	Prognos und Wuppertal Institut (2022)
Produktionsneutral	Küster Simic und Schönfeldt (2022)
KN100	EWI et al. (2021)
Zielpfad	Boston Consulting Group (2021)
KN2045	Prognos et al. (2021)
Technologiemix	Kopernikus-Projekt Ariadne (2021)

Quelle: Eigene Darstellung.

nahmen der einzelnen Studien aus Tabelle 1 detaillierter behandelt. Am Ende des Absatzes werden in Klammern immer die Szenarien aufgeführt, die diese Aussage explizit nennen.

Die überwiegende Mehrheit der Szenarien legt ihren Annahmen explizit die Erreichung der Klimaneutralität 2045 zugrunde. Dabei werden die Minderungsziele für die Stichjahre 2030 und 2040 erreicht (KN100, KN2045, Langfristszenarien, OptiKLIND, S4C-KN, Transformationspfade).

Einige Szenarien gehen explizit von einer Verstärkung der globalen Klimaschutzanstrengungen aus. Dabei wird auch der Rest der Welt in den kommenden Jahren die Klimaschutzanstrengungen verschärfen, auch wenn dies in unterschiedlichen Geschwindigkeiten passiert (OptiKLIND, S4C-KN).

Einige Szenarien legen explizit eine Konsistenz ihrer Annahmen im Gesamtsystem zugrunde. Sie berücksichtigen somit Transformationsprozesse in anderen Branchen der Volkswirtschaft. Dabei wurden insbesondere Einschränkungen in der Verfügbarkeit von Energieträgern oder Rohstoffen wie zum Beispiel Grünem Wasserstoff berücksichtigt (KN100, Langfristszenarien, OptiKLIND).

Zahlreiche Szenarien berücksichtigen auch explizit bestehende Förderinstrumente. Dabei geht es vor allem um Anschubfinanzierungen, wie sie bereits durch Investitionsförderungen und Klimaschutzverträge vorgesehen sind (Langfristszenarien, OptiKLIND, Produktionsneutral, Transformationspfade, Zielpfad).

In einigen zuletzt veröffentlichen Szenarien werden auch die Auswirkungen des russischen Angriffskriegs gegen die Ukraine einbezogen. Dabei finden insbesondere die in dessen Folge erhöhten Energiepreise Berücksichtigung (Langfristszenarien, OptiKLIND, S4C-KN, Transformationspfade).

Es bleibt festzuhalten: Eine Reihe von Studien beschäftigt sich mit der Transformation der deutschen Stahlindustrie, jedoch werden Stahlschrottbedarf und Schrotteinsatzquoten dabei typischerweise außen vor gelassen. Die zahlreichen eingebetteten Annahmen verdeutlichen jedoch, dass die betrachteten Szenarien großen Wert auf eine Konsistenz im Gesamtsystem legen, was sie zu einer belastbaren Grundlage für diese Studie macht.

3.2 Entwicklung der Rohstahlproduktion

3.2.1 Historische Entwicklung und Status quo

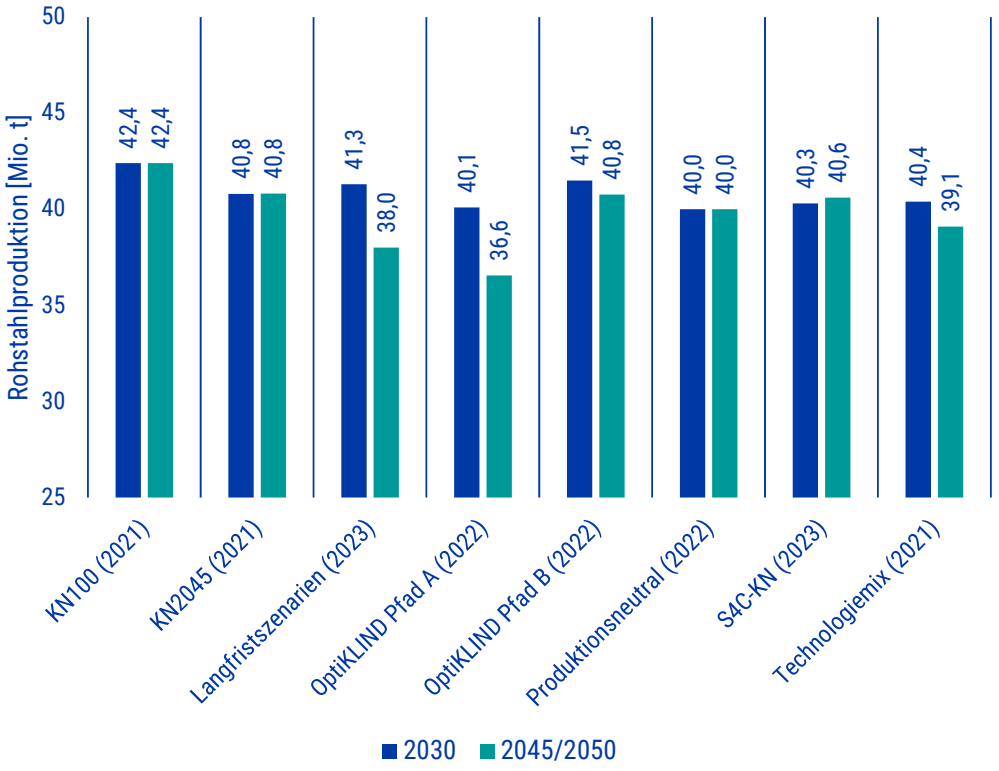
Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der Rohstahlproduktion in Deutschland von 2003 bis 2023. Zwischen 2003 und 2006 wurden durchschnittlich 45,7 Mio. t Rohstahl produziert. Im Jahr 2007 wurde mit einer Produktion von 48,5 Mio. t ein Rekordwert erreicht. Danach ging die Produktion infolge der globalen Finanz- und Wirtschaftskrise sowie wachsender chinesischer Produktion deutlich zurück. Im Jahr 2009 gab es gegenüber 2008 einen Einbruch um fast 30 % auf nur noch 32,7 Mio. t. In den Jahren 2010 und 2011 folgte eine Erholung. Die Produktionsmengen pendelten sich in den Folgejahren bis 2018 zwischen 42,1 Mio. t und 43,3 Mio. t ein. Im Durchschnitt wurden zwischen 2010 und 2018 jährlich 43,0 Mio. t Rohstahl produziert.

Ab 2019 gingen die Produktionsmengen deutlich zurück. Sie lagen bis 2023 zwischen 35,4 Mio. t und 40,2 Mio. t. Im Jahr 2023 ist die Rohstahlproduktion mit 35,4 Mio. t auf das niedrigste Niveau seit 2009 gesunken. Besonders drastisch sank im Jahr 2023 die Produktion der stromintensiven EAF-Route. Sie fiel gegenüber 2022 um ca. 11 % auf 9,8 Mio. t und unterschritt damit den Tiefpunkt während der globalen Finanz- und Wirtschaftskrise 2008/2009 mit 11,3 Mio. t. Die Wirtschaftsvereinigung Stahl sieht vor allem die hohen Strompreise in Kombination mit der schwachen Baukonjunktur als Grund (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2024a). Die Produktion in der BF-BOF-Route konnte sich gegenüber 2022 auf einem niedrigen Niveau stabilisieren (Siebel, 2024). Nichtsdestoweniger befindet sich die Stahlindustrie in Deutschland weiterhin in der Krise.

3.2.2 Aussagen ausgewählter Szenarien

Die ausgewerteten Szenarien treffen typischerweise Annahmen für die Stichjahre 2030 und 2045 oder 2050. Abbildung 2 stellt die Produktionsmengen der Stichjahre 2030 und 2045/2050 gegenüber. Die folgenden Ausführungen fassen die Stichjahre 2045 und 2050 aus Gründen der Übersichtlichkeit und Verständlichkeit zusammen.

Abbildung 2
Gegenüberstellung der Produktionsmengen 2030 und 2045/2050



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an EWI et al. (2021, KN100); Prognos et al. (2021, KN2045); Consentec et al. (2021, Langfristszenarien); Prognos und Wuppertal Institut (2022, OptiKLIND Pfad A und B); Küster Simic und Schönfeldt (2022, Produktionsneutral); Wuppertal Institut und IW (2023, S4C-KN); Kopernikus-Projekt Ariadne (2021, Technologiemix).

Abbildung 2 verdeutlicht, dass alle ausgewerteten Szenarien zum Stichjahr 2030 von einer Erholung der Rohstahlproduktion gegenüber 2023 ausgehen. Die Rohstahlproduktion schwankt dabei zwischen 40 Mio. t im Szenario Produktionsneutral und 42,4 Mio. t im Szenario KN100. Zum Stichjahr 2045/2050 geht die überwiegende Zahl der Szenarien von einer konstanten oder leicht rückläufigen Rohstahlproduktion gegenüber 2030 aus. Sie bewegt sich dabei zwischen 36,6 Mio. t im Szenario OptiKLIND Pfad A und 42,4 Mio. t im Szenario KN100. Dies verdeutlicht, dass im wissenschaftlichen Diskurs bis 2030 eine Erholung der Rohstahlproduktion im Vergleich zum Krisenjahr 2023 und von dort ausgehend eine nahezu konstante bis leicht abnehmende Tendenz als plausibel angesehen wird.

3.3 Entwicklung der Verfahrensrouten

3.3.1 Historische Entwicklung und Status quo

In Deutschland wird Stahl aktuell in drei Verfahrensrouten hergestellt. Es entfallen etwa 70 % auf die BF-BOF-Route, 28 % auf die konventionelle EAF-Route und 2 % auf die DR-EAF-Route. Diese Zusammensetzung war über die letzten zwanzig Jahre hinweg weitgehend stabil (Prognos und Wuppertal Institut, 2022).

3.3.2 Aussagen ausgewählter Szenarien

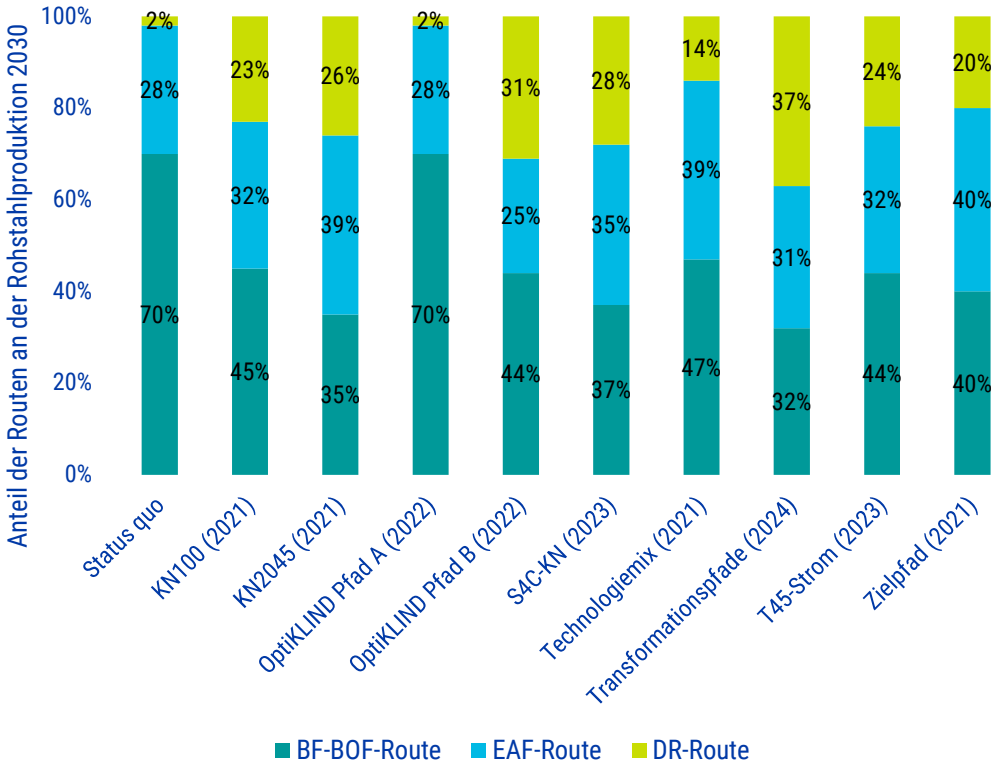
Genau wie für die Produktionsmengen wurden auch für die Verfahrensrouten in den ausgewerteten Studien Annahmen für die Stichjahre 2030 und 2045/2050 getroffen. Abbildung 3 zeigt die Annahmen zum Stichjahr 2030 und Abbildung 4 die zum Stichjahr 2045/2050. Beide Abbildungen zeigen zur besseren Vergleichbarkeit den Status quo und zur Einordnung der Aktualität das Veröffentlichungsjahr der Szenarien. Inwieweit die DR-EAF-Route mit Wasserstoff betrieben wird, wird im Folgenden nicht weiter betrachtet. Die Wahl des Energieträgers in der Direktreduktion dürfte keine wesentlichen direkten Auswirkungen auf den Schrottbedarf haben.

Abbildungen 3 und 4 illustrieren, dass sich die erwarteten Verfahrensrouten in einem Korridor bewegen und lediglich das Szenario OptiKLIND A merklich abweicht. In diesem Entwicklungspfad werden aufgrund geringer internationaler Kooperation die nationalen Restriktionen (insbesondere die Verfügbarkeit von Grünem Wasserstoff) deutlich spürbar. Deshalb bleiben die Anteile der Verfahrensrouten zum Stichjahr 2030 zunächst unverändert. Es handelt sich darüber hinaus um das einzige Szenario, welches zum Stichjahr 2050 einen Weiterbetrieb von Hochöfen mit CCU-CCS-Technologie in Betracht zieht.

Alle Szenarien gehen von einem Kapazitätsausbau der DR-Route aus (mit Ausnahme von OptiKLIND A im Jahr 2030). Die Anteile schwanken zum Stichjahr 2030 zwischen 2 % im Szenario OptiKLIND A und 37 % im Szenario Transformationspfade. In sieben der neun betrachteten Szenarien liegt der Anteil der DR-Route bei über 20 %. Zum Stichjahr 2045/2050 schwanken die Anteile zwischen 49 % im Szenario OptiKLIND A und 69 % im Szenario Transformationspfade.

Innerhalb der DR-Route kann zwischen der DR-EAF-Route und der DR-SAF-BOF-Route unterschieden werden. Laut aktueller Ankündigungen strebt thyssenkrupp als einziger Primärstahlhersteller in Deutschland die DR-SAF-BOF-Route an. Die übrigen setzen auf die DR-EAF-Route (Prognos und Wuppertal Institut, 2022).

Abbildung 3
Gegenüberstellung der Verfahrensrouten zum Stichjahr 2030



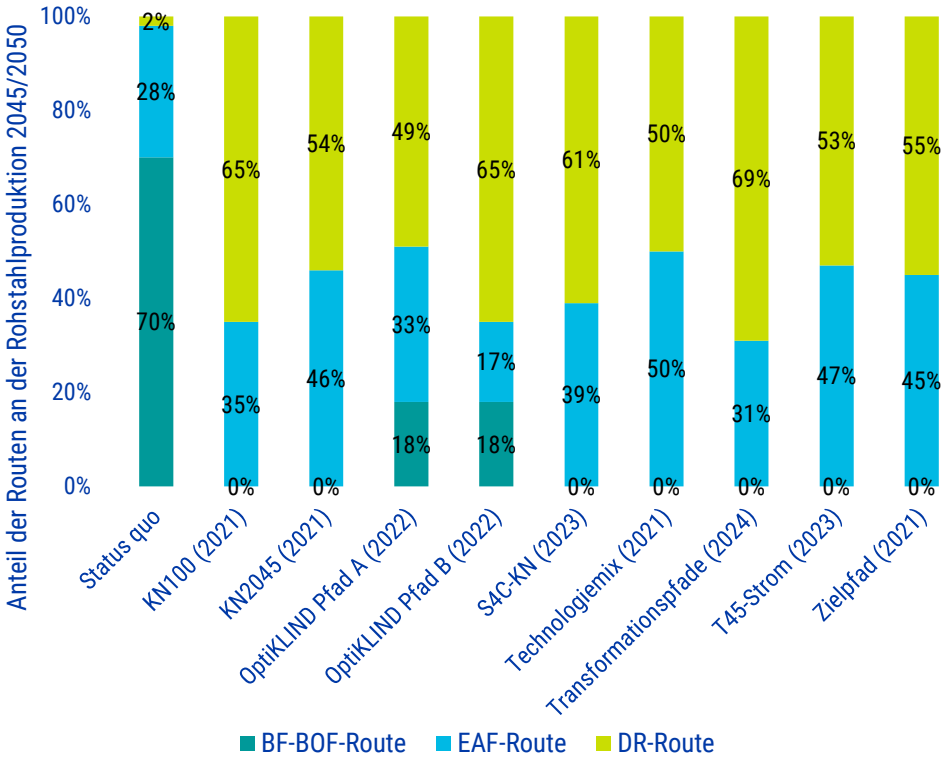
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Wirtschaftsvereinigung Stahl (2022, Status quo); EWI et al. (2021, KN100); Prognos et al. (2021, KN2045); Prognos und Wuppertal Institut (2022, OptiKLIND Pfad A und B); Wuppertal Institut und IW (2023, S4C-KN); Kopernikus-Projekt Ariadne (2021, Technologiemix); Boston Consulting Group und IW (2024, Transformationspfade); Consentec et al. (2021, T45-Strom); Boston Consulting Group (2021, Zielpfad).

Der Kapazitätsausbau der DR-Route geht in allen Szenarien mit einem Rückgang in der BF-BOF-Route einher. Deren Anteil schwankt zum Stichjahr 2030 zwischen 32 % im Szenario Transformationspfade und 70 % im Szenario OptiKLIND Entwicklungspfad A. Zum Stichjahr 2045/2050 gehen alle Szenarien von einer vollständigen Verdrängung der BF-BOF-Route aus. Ausnahmen sind die OptiKLIND-Szenarien. Hier macht die BF-BOF-Route auch 2050 noch einen Anteil von 18 % aus.

Fast alle betrachteten Szenarien gehen von einer moderaten Steigerung der schrottbasierten EAF-Route aus. Die Studien sehen den Umfang der Steigerung in der Regel durch die Schrottverfügbarkeit oder die fehlende Möglichkeit, Stähle mit hohen Anforderungen zu produzieren, limitiert. Die Anteile bewegen sich zum Stichjahr 2030 zwischen 25 % und 40 %. Zum Stichjahr 2045/2050 schwanken sie zwischen 17 % und 50 %.

Allen Szenarien ist gemeinsam, dass sie langfristig von THG-neutralen Produktionsverfahren ausgehen. Lediglich die Geschwindigkeit des Transformationsprozesses variiert

Abbildung 4
Gegenüberstellung der Verfahrensrouten zum Stichjahr 2045/2050



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Wirtschaftsvereinigung Stahl (2022, Status quo); EWI et al. (2021, KN100); Prognos et al. (2021, KN2045); Prognos und Wuppertal Institut (2022, OptiKLIND Pfad A und B); Wuppertal Institut und IW (2023, S4C-KN); Kopernikus-Projekt Ariadne (2021, Technologiemix); Boston Consulting Group und IW (2024, Transformationspfade); Consentec et al. (2021, T45-Strom); Boston Consulting Group (2021, Zielpfad).

zwischen den Szenarien. Der technologische Weg erscheint damit weitgehend vorgegeben. Das wird auch durch die Wirtschaftsvereinigung Stahl bestätigt: Sie erwartet, dass bis 2030 etwa die Hälfte der Primärstahlproduktion auf die DR-Route umgestellt werden kann und dass Stahl ab 2045 sogar ausschließlich über die EAF-Route und die H_2-DR-Route produziert werden wird (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2023a).

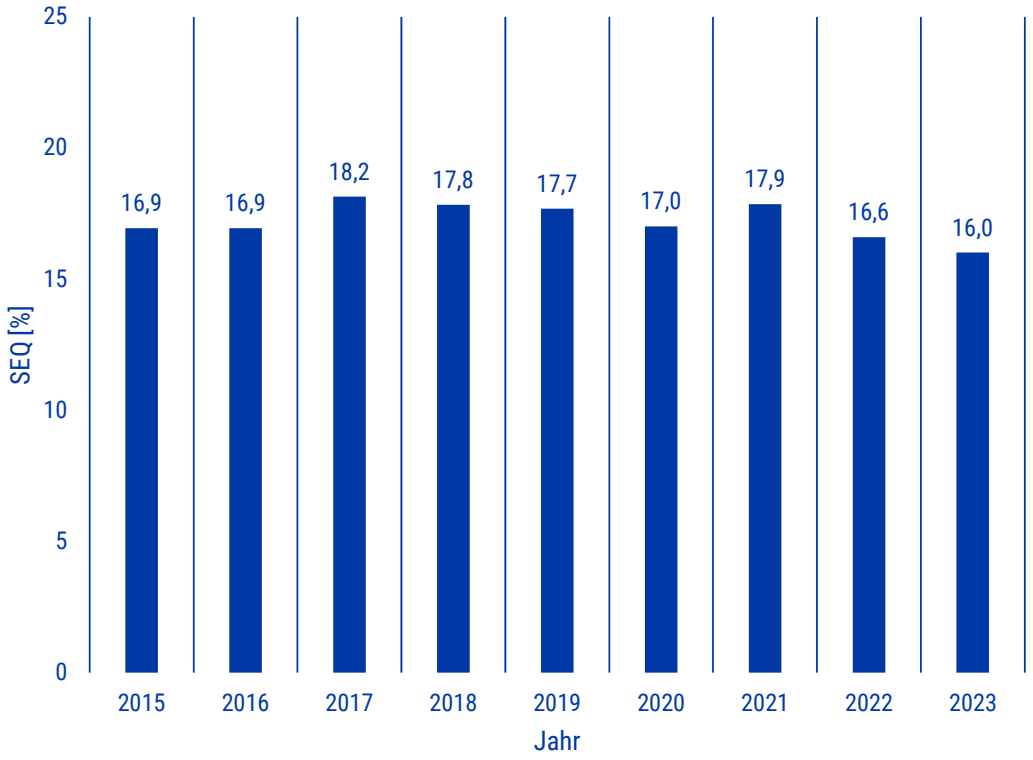
Eine Befragung von Experten aus Unternehmen, die insgesamt 93 % der Primärstahlproduktion in Deutschland stellen, unterstreicht, dass dieser Technologiemix ein plausibles Bild über die Zukunft zeichnet. Die Szenarien bilden in Bezug auf den zukünftigen Technologiemix die überwiegende Meinung der Experten ab, dass die Primärstahlproduktion sukzessive auf die DR-Route umgestellt werden wird (Küster Simic und Schönfeldt, 2022). Auch die Transformationspläne der großen Primärstahlproduzenten decken sich mit den Annahmen der Szenariostudien. Diese Pläne werden in Appendix A dargestellt und diskutiert.

3.4 Entwicklung der Schrotteinsatzquoten

3.4.1 Konverter und Einschmelzer

Bei der Umwandlung von flüssigem Roheisen in Rohstahl kommt in der BF-BOF-Route (und perspektivisch in der DR-SAF-BOF-Route) ein Konverter zum Einsatz. Dort sorgt das Einblasen von Sauerstoff unter hoher Wärmeentwicklung für eine Oxidation unerwünschter Begleitelemente. Der eingesetzte Stahlschrott sorgt für die Kühlung der stark exothermen Reaktion (Stahlinstitut VDEh, o.J.). Abbildung 5 zeigt die Schrotteinsatzquote im BOF für die Jahre 2015 bis 2023. Die SEQ lag über den gesamten Zeitraum hinweg bei durchschnittlich 17,2 %. Sie schwankte zwischen 16,0 % im Jahr 2023 und 18,2 % im Jahr 2017. Ein Trend ist dabei nicht erkennbar.

Abbildung 5
Entwicklung der Schrotteinsatzquoten im Konverter



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Wirtschaftsvereinigung Stahl (2021, 2023a, 2024b).

Im Rahmen der DR-SAF-BOF-Route könnte Stahlschrott zukünftig zusätzlich im Einschmelzer (Submerged Arc Furnace, SAF) zum Einsatz kommen. Elektrische SAF zur Herstellung von Roheisen sind noch nicht im industriellen Maßstab verfügbar (Caviezel et al., 2024). Aus diesem Grund sind auch keine SEQ dokumentiert. Die SMS Group plant mit thyssenkrupp ein solches Verfahren. Ein Schrotteinsatz von 10 % wird dabei als möglich

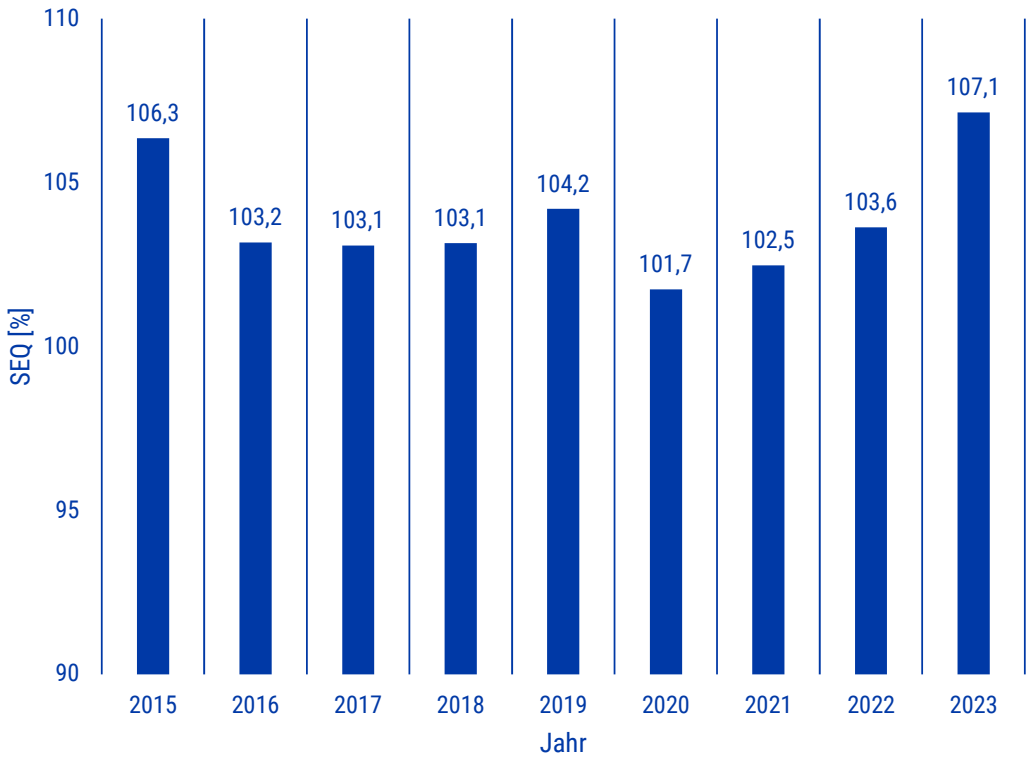
angesehen und kann ökonomische Vorteile aufweisen (Kleier, 2023). Die Unsicherheit über den Schrotteinsatz im SAF wird bei der Entwicklung der Szenarien berücksichtigt.

3.4.2 Elektrolichtbogenofen

In der konventionellen EAF-Route ist die Rohstoffbasis (fast) ausschließlich Stahlschrott. Abbildung 6 zeigt die SEQ im EAF in Deutschland für die Jahre 2015 bis 2023. Sie lag über diesen Zeitraum hinweg bei durchschnittlich 103,9 %. Die SEQ liegt bei hochlegierten Stählen tendenziell niedriger, da oftmals Legierungselemente hinzugegeben werden.

Eine SEQ von mehr als 100 % erscheint auf den ersten Blick paradox, ist aber einfach zu erklären: Sie spiegelt Schmelzverluste, also den Verlust von Material beim Einschmelzen (zum Beispiel durch Verschlackung), wider. Die SEQ schwankte zwischen 101,7 % im Jahr 2020 und 107,1 % im Jahr 2023. Ein Trend ist in diesem Zeitraum nicht erkennbar. Daher sind die zukünftigen SEQ auf dieser Basis gut abschätzbar.

Abbildung 6
Entwicklung der Schrotteinsatzquoten im Elektrolichtbogenofen



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Wirtschaftsvereinigung Stahl (2021, 2023a, 2024b)

Wesentlich größer ist die Unsicherheit über die SEQ in der DR-EAF-Route. Die Wirtschaftsvereinigung Stahl geht von SEQ zwischen 15 % und 50 % aus. Das ist eine große

Bandbreite, die wir über Szenarien abbilden. Es ist allerdings fraglich, ob in Zukunft eine strikte Trennung der konventionellen EAF-Route und der DR-EAF-Route überhaupt sinnvoll sein wird, da der Rohstoffeinsatz im EAF grundsätzlich flexibel ist. Im Rahmen der Studie werden beide Routen getrennt betrachtet, um separate Annahmen über die SEQ treffen zu können.

4 Szenarien für den Stahlschrottbedarf in Deutschland

4.1 Annahmen

4.1.1 Produktionsmengen

Wir treffen – in Anlehnung an Gleichung (1) – Annahmen über Produktionsmengen, Anteile von Verfahrensrouten und Schrotteinsatzquoten. Tabelle 2 zeigt die Annahmen für die Rohstahlproduktion in Deutschland für die Stichjahre 2030 und 2045. Dazu werden drei Pfade (1, 2 und 3) unterschieden. Diese sollen eine plausible Bandbreite möglicher Entwicklungen abbilden.

Pfad 1 spiegelt eine positive Entwicklung in der deutschen Stahlindustrie wider. Pfad 1 bildet den Durchschnitt der ausgewerteten Szenarien ab. Die Rohstahlproduktion findet zum Stichjahr 2030 mit 41 Mio. t auf ein Vorkrisenniveau zurück. Zum Stichjahr 2045 wird ein leichter Rückgang auf 40 Mio. t unterstellt. Vor dem Hintergrund der niedrigen Rohstahlproduktion der vergangenen Jahre und dem angekündigten Kapazitätsabbau in der deutschen Stahlindustrie (z.B. thyssenkrupp, 2024) kann der Pfad 1 als bestmögliche Entwicklung interpretiert werden.

Tabelle 2
Annahmen Rohstahlproduktion

Pfadausprägung	Stichjahr 2030	Stichjahr 2045
1	41	40
2	39	35
3	35	28

Rohstahlproduktion in Mio. t pro Jahr. Quelle: Eigene Darstellung unter Bezugnahme auf die ausgewerteten Daten und Szenariostudien.

Die für Pfad 2 getroffenen Annahmen bilden eine mittlere Entwicklung der Rohstahlproduktion ab. Hier wurde der historische Trend der Rohstahlproduktion von 2003-2023 zugrunde gelegt. Dieser wurde, um den Produktionsrückgang zu dämpfen, um die Jahre

2019-2023 bereinigt. Das ergibt zum Stichjahr 2030 eine Rohstahlproduktion von 39 Mio. t und zum Stichjahr 2045 einem Rückgang auf 35 Mio. t.

Eine negative Entwicklung spiegelt Pfad 3 wider. Hier wird der unbereinigte historische Trend von 2003-2023 zugrunde gelegt. Der Einbezug der Jahre 2019-2023 verschiebt die Produktionsmengen deutlich nach unten. Daraus resultiert zum Stichjahr 2030 eine Rohstahlproduktion von 35 Mio. t und zum Stichjahr 2045 ein weiterer Rückgang auf nur noch 28 Mio. t. Pfad 1 orientiert sich somit an den Szenarien aus der Literatur, die Pfade 2 und 3 berücksichtigen mögliche Risiken, Krisen und rückläufige Entwicklungen.

4.1.2 Verfahrensrouten

Für die Entwicklung der Verfahrensrouten wird nur eine Ausprägung betrachtet. Das ist durch die als geringer eingeschätzten Unsicherheiten begründet. Der zukünftige Technologiemix ist auf Basis der ausgewerteten Szenarien und Transformationspläne relativ klar vorgegeben, auch wenn die Geschwindigkeit der Transformation von Faktoren wie den Energiepreisen abhängt.

Die getroffenen Annahmen ergeben sich aus den Mittelwerten der ausgewerteten Szenarien mit Ausnahme der OptiKLIND-Szenarien. In diesen erfolgt die Primärstahlproduktion langfristig ausschließlich über die DR-Routen. Der Anteil der Sekundärstahlproduktion in der EAF-Route nimmt im Zeitverlauf moderat zu.

Tabelle 3
Annahmen Verfahrensrouten

Verfahrensroute	Status quo	Stichjahr 2030	Stichjahr 2045
BF-BOF	70	40	0
EAF	28	35	42
DR-EAF	2	17	39
DR-SAF-BOF	0	8	19

Anteile der Verfahrensrouten in Prozent. Quelle: Eigene Darstellung unter Bezugnahme auf die ausgewerteten Daten und Szenariostudien.

Tabelle 3 zeigt die Annahmen über die Zusammensetzung der Verfahrensrouten für die Stichjahre 2030 und 2045, ergänzt um den Status quo. Der Anteil der BF-BOF-Route sinkt zum Stichjahr 2030 auf 40 %, zum Stichjahr 2045 spielt sie keine Rolle mehr. Der Rückgang wird zum Großteil durch das Anwachsen der beiden DR-Routen kompensiert. Deren Anteil steigt zum Stichjahr 2030 auf 25 % und zum Stichjahr 2045 auf 58 %.

Der Rest wird durch einen Anstieg der EAF-Route kompensiert. Deren Anteil steigt zum Stichjahr 2030 auf 35 % und zum Stichjahr 2045 auf 42 %.

Es wird angenommen, dass 33 % der DRI-Route mit SAF und BOF weiterverarbeitet werden und der Rest (67 %) mit dem EAF. Diese Annahme orientiert sich an der Überlegung, dass thyssenkrupp derzeit als einziger Produzent eine Weiterverarbeitung von DRI mit SAF und BOF anstrebt.

4.1.3 Schrotteinsatzquoten

Tabelle 4 zeigt die Annahmen zur Entwicklung der SEQ für die Stichjahre 2030 und 2045. Zur Modellierung der Szenarien wurden Annahmen für drei Pfade (A, B und C) getroffen. Diese sollen eine plausible Bandbreite möglicher Entwicklungen der SEQ abbilden.

Für die BF-BOF-Route wird für alle Pfade eine SEQ von 20 % angenommen. Dies unterstellt, dass eine moderate Steigerung des Schrotteinsatzes in der BF-BOF-Route technisch wie wirtschaftlich möglich ist. Für das Stichjahr 2045 ist diese SEQ für die BF-BOF-Route eine theoretische Annahme, da die Rohstahlproduktion im Hochofen zu diesem Zeitpunkt in den Szenarien keine Rolle mehr spielt, der tatsächliche Schrotteinsatz also bei 0 Mio. t liegt.

Tabelle 4
Annahmen Schrotteinsatzquoten

Pfadausprägung	Verfahrensroute	Stichjahr 2030	Stichjahr 2045
A	BF-BOF	20	20
	EAF	104	104
	DR-EAF	15	15
	DR-SAF-BOF	20	20
B	BF-BOF	20	20
	EAF	104	104
	DR-EAF	32	32
	DR-SAF-BOF	25	25
C	BF-BOF	20	20
	EAF	104	104
	DR-EAF	50	50
	DR-SAF-BOF	30	30

Schrotteinsatzquoten (SEQ) in Prozent. Quelle: Eigene Darstellung unter Bezugnahme auf die ausgewerteten Daten und Szenariostudien.

Für die DR-SAF-BOF-Route wird im Pfad A eine SEQ von insgesamt 20 % unterstellt. Im Pfad B wird für die DR-SAF-BOF-Route von einer SEQ von 25 % ausgegangen, im Pfad C von 30 %.

Für die schrottbasierte EAF-Route wird in allen Pfaden für beide Stichjahre eine SEQ von 104 % angenommen. Die Annahme entspricht dem gerundeten Mittelwert der Jahre 2015 bis 2023, der in dieser Periode nur leichten Schwankungen unterliegt.

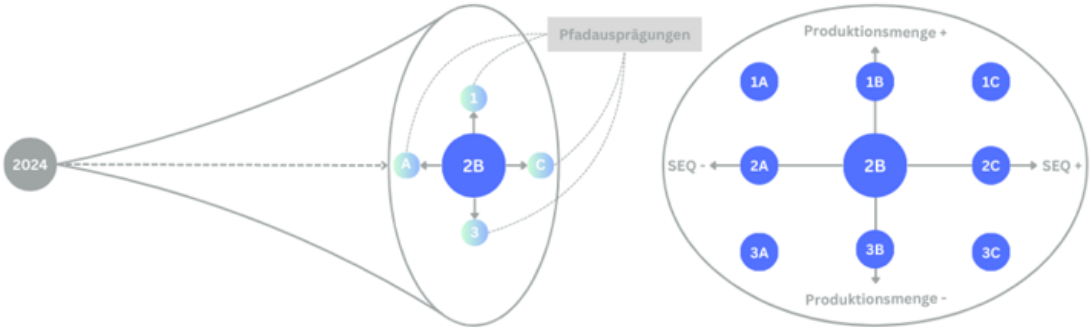
Unsicherer sind die SEQ der DR-EAF-Route. Hier wird in den Pfaden deshalb von unterschiedlichen SEQ ausgegangen. Die Annahmen greifen eine Bandbreite von 15 % bis 50 % auf. Die höchste SEQ weist Pfad C auf, die niedrigste der Pfad A. Pfad B bildet mit einer SEQ von 32 % den Mittelweg zwischen diesen Werten ab.

4.2 Szenarien Stahlschrottbedarf

4.2.1 Überblick

Abbildung 7 gibt einen Überblick über die Szenarien. Die Pfade künftiger Produktionsmengen (1, 2 und 3) befinden sich auf der vertikalen Achse und die Pfade zukünftiger Schrotteinsatzquoten (A, B und C) auf der horizontalen Achse. Alle Kombinationen der Pfade sind mit dem einheitlichen Technologiemix unterlegt. Aus diesen Kombinationen ergeben sich insgesamt 9 Szenarien. Alle Szenarien implizieren einen Stahlschrottbedarf zum Stichjahr 2030 und 2045 (vgl. Gleichung 1).

Abbildung 7
Überblick Pfade und resultierende Szenarien



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an EWI et al. (2021).

Die Szenarien 3A (geringe Stahlproduktionsmenge bei gleichzeitig geringen Schrotteinsatzquoten) und 1C (hohe Produktionsmenge bei gleichzeitig hohen Schrotteinsatzquoten) bilden den Rahmen der minimalen und maximalen Schrottbedarfe in den Stichjahren. Sze-

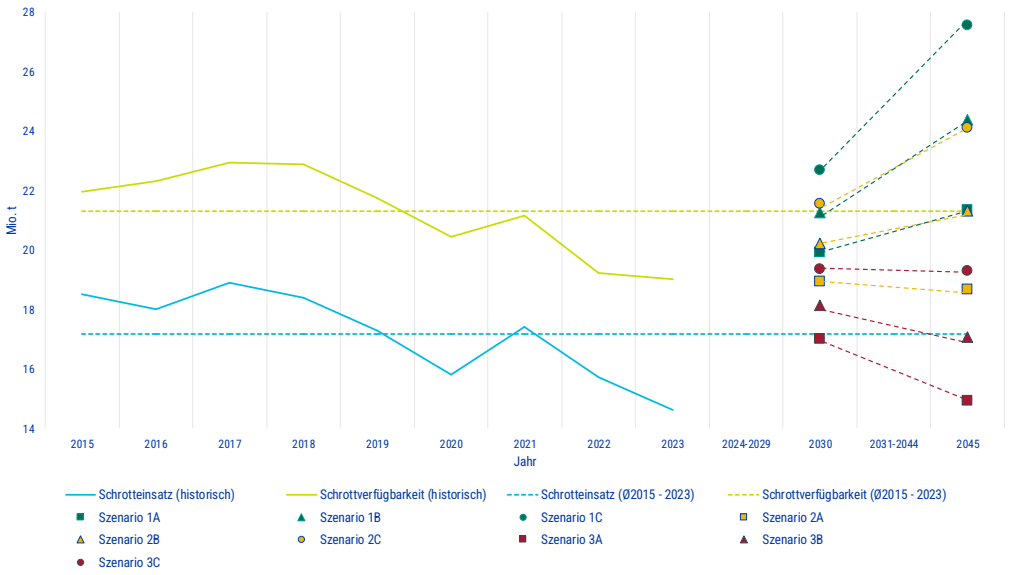
nario 2B kann als Mittelweg der getroffenen Annahmen interpretiert werden.

4.2.2 Schrottbedarf für die Rohstahlproduktion

Abbildung 8 zeigt den implizierten Stahlschrottbedarf in den neun Szenarien im Vergleich zu Stahlschrotteinsatz und Stahlschrottverfügbarkeit von 2015 bis 2023. Die durchgezogene blaue Linie illustriert den Schrotteinsatz der deutschen Stahlindustrie zwischen 2015 und 2023 (vgl. Abbildung 1). Die gestrichelte blaue Linie zeigt den durchschnittlichen Stahlschrotteinsatz von 17,2 Mio. t in diesem Zeitraum. Beide dienen als Referenz zur Einordnung der Szenarien.

Die durchgezogene grüne Linie zeigt die Verfügbarkeit von Stahlschrott in Deutschland. Sie setzt sich aus dem Schrotteinsatz und dem Nettoexport von Stahlschrott zusammen. Somit spiegelt diese Kurve das Angebot von Stahlschrott zwischen 2015 und 2023 wider. Die gestrichelte grüne Linie zeigt die durchschnittliche Stahlschrottverfügbarkeit von 21,3 Mio. t in diesem Zeitraum an. Stahlschrotteinsatz und -verfügbarkeit aus der Vergangenheit dienen als Vergleichsgrundlage für die Szenarien.

Abbildung 8
Schrottbedarf in den Szenarien



Stahlschrottbedarf der deutschen Stahlindustrie in Mio. t. Blaue Linie: Schrotteinsatz der deutschen Stahlindustrie 2015 - 2023. Gestrichelte blaue Linie: durchschnittlicher Schrotteinsatz 2015 - 2023. Grüne Linie: Schrottverfügbarkeit in Deutschland (Schrotteinsatz + Nettoexport) 2015 - 2023. Gestrichelte grüne Linie: durchschnittliche Schrottverfügbarkeit 2015 - 2023.
Grüne Szenarien: Pfad 1 (hohe Rohstahlproduktion). Gelbe Szenarien: Pfad 2 (mittlere Rohstahlproduktion). Rote Szenarien: Pfad 3 (niedrige Rohstahlproduktion). Quadratische Markierungen: Pfad A (niedrige SEQ). Dreieckige Markierungen: Pfad B (mittlere SEQ). Runde Markierungen: Pfad C (hohe SEQ).
Quelle: Eigene Berechnung der Szenarien.

Die Markierungen in den Jahren 2030 und 2045 stellen den implizierten Schrottbedarf dar. Die konkreten Zahlenwerte und Pfadkombinationen finden sich auch in Tabelle 5. Im Jahr 2030 implizieren fast alle Szenarien einen Anstieg des Schrottbedarfs gegenüber dem Durchschnitt von 2015 bis 2023. Nur im Szenario 3A, in dem die Rohstahlproduktion spürbar sinkt und die SEQ der neuen Produktionstechnologien niedrig ist, verringert sich der Stahlschrottbedarf auf 17,0 Mio. t. In den Szenarien 1C und 2C liegt der Schrottbedarf oberhalb der durchschnittlichen Verfügbarkeit von 2015 bis 2023 von 21,3 Mio. t. Im Szenario 2C liegt der implizierte Einsatz bei 21,6 Mio. t, im Szenario 1C sogar bei 22,7 Mio. t. Diese Werte liegen jedoch unterhalb des Höchstwerts der Schrottverfügbarkeit von 22,9 Mio. t in den Jahren 2017 und 2019.

Tabelle 5
Schrottbedarf in den Szenarien

Szenario	Rohstahlproduktion	SEQ	Stichjahr 2030	Stichjahr 2045
1A	hoch	niedrig	19,9	21,3
1B		mittel	21,3	24,4
1C		hoch	22,7	27,6
2A	mittel	niedrig	18,9	18,7
2B		mittel	20,2	21,3
2C		hoch	21,6	24,1
3A	niedrig	niedrig	17,0	14,9
3B		mittel	18,1	17,1
3C		hoch	19,4	19,3

Stahlschrottbedarf der deutschen Stahlindustrie in Mio. t. Im Zeitraum von 2015 bis 2023 lag der durchschnittliche Schrotteinsatz bei 17,2 Mio. t pro Jahr, die durchschnittliche Verfügbarkeit bei 21,3 Mio. t. Quelle: Eigene Berechnung der Szenarien.

Im Stichjahr 2045 wird die Bandbreite des Schrottbedarfs deutlich größer. Sie liegt zwischen 14,9 Mio. t (Szenario 3A) und 27,6 Mio. t (Szenario 1C). Auch tritt die Bedeutung der Rohstahlproduktion als Determinante des Schrottbedarfs noch deutlicher hervor: Die Pfade der Rohstahlproduktion (1, 2 und 3) überlappen wenig. Mit anderen Worten: Die zukünftige Rohstahlproduktion scheint für den Bedarf an Schrott insgesamt – zumindest in den hier betrachteten Bandbreiten – wichtiger als die SEQ der neuen Technologien.

Bei optimistischen Erwartungen für die Stahlproduktion in Deutschland, gerade in Kombination mit hohen SEQ, ist ein Schrottbedarf deutlich oberhalb der historischen Verfügbarkeit denkbar. Ein solcher Bedarf müsste entweder über zusätzliches Angebot

durch verstärktes Urban Mining in Deutschland oder durch Importe gedeckt werden.

Sollte die Rohstahlproduktion in Deutschland fallen (Pfad 3), dürfte der Stahlschrottbedarf 2045 aufgrund der zunehmenden SEQ in den Verfahrensrouten in der Größenordnung der Jahre 2015 bis 2023 bleiben. Im Szenario 3A, in dem die neuen Routen der Rohstahlproduktion (DR-EAF, DR-SAF-BOF) mit niedrigen SEQ arbeiten, ergibt sich ein Schrottbedarf von 14,9 Mio. t. Dieser Wert liegt immer noch um etwa 300.000 t über dem des Krisenjahrs 2023.

Unter der Maßgabe, dass die Rohstahlproduktion in Deutschland gegenüber dem langfristigen Durchschnitt moderat sinkt (Pfad 2), liegt der implizierte Schrottbedarf im Bereich der Verfügbarkeit der Jahre 2015 bis 2023. Nur im Szenario 2C (hohe SEQ) übersteigt der Schrottbedarf mit 24,1 Mio. t diese Größenordnung.

4.2.3 Bedarf an hochwertigem Schrott

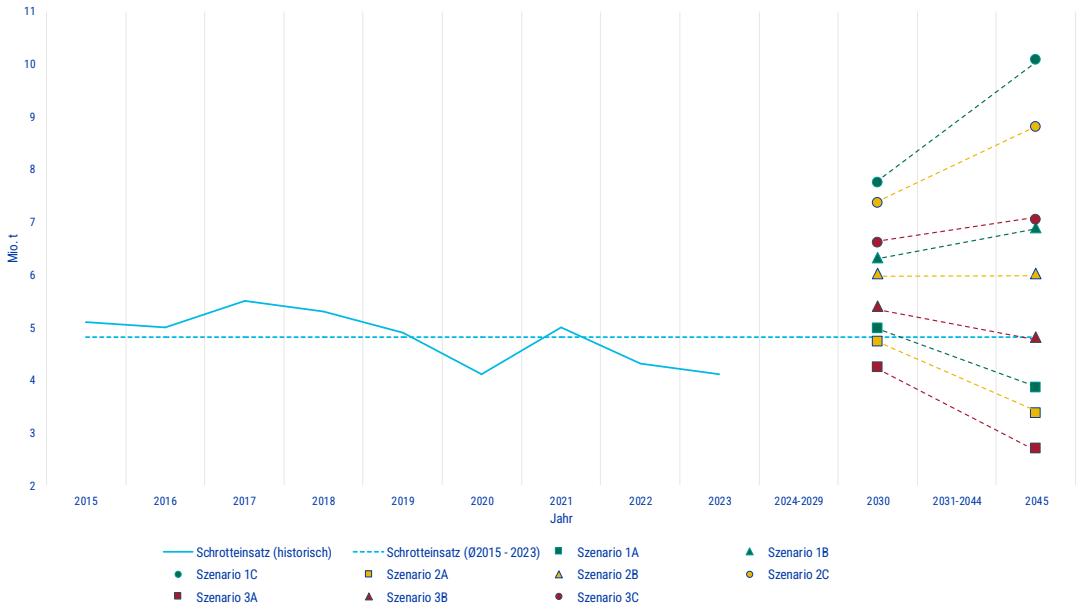
Die Ergebnisse in Abschnitt 4.2.2 betrachten den zukünftigen Stahlschrottbedarf in Deutschland insgesamt. Sie lassen einen zentralen Aspekt außen vor: die Qualitätsansprüche an den Stahlschrott. Eine detaillierte Analyse benötigter Stahlschrottsorten ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich. Nichtsdestoweniger sollen die benötigten Mengen zumindest approximiert werden.

Die Primärproduktion von Stahl (heute in der BF-BOF-Route) produziert in erster Linie anspruchsvollen Flachstahl für Automobil- oder Maschinenbau, die schrottbasierten EAF fertigen in Deutschland typischerweise weniger anspruchsvollen Langstahl. Unterstellt man, dass dieses Muster auch in Zukunft bestehen bleibt, kann der Schrottbedarf für die Primärproduktion in BF-BOF-, DR-EAF- und DR-SAF-BOF-Route mittels unserer Szenarien quantifiziert werden. Daraus lässt sich eine sehr grobe Aussage über den Bedarf an hochwertigem Schrott treffen.

Abbildung 9 illustriert diesen Bedarf an hochwertigem Stahlschrott. Sie ist analog zu Abbildung 8 zu interpretieren. Die durchgezogene blaue Linie stellt den Schrotteinsatz der BF-BOF-Route zwischen 2015 und 2023 dar. Die gestrichelte blaue Linie zeigt den Durchschnittswert von 4,8 Mio. t in diesem Zeitraum.

Die Verfügbarkeit von Stahlschrott für die BF-BOF-Route kann nicht analog zu Abbildung 8 quantifiziert werden, weil der Nettoexport von Stahlschrott nicht nach Verwendung in BF-BOF-Route und EAF-Route aufgeschlüsselt ist. Die neun Szenarien werden genauso dargestellt wie in Abbildung 8. Die Zahlen finden sich auch in Tabelle 6.

Abbildung 9
Bedarf an hochwertigem Schrott in den Szenarien



Stahlschrottbedarf der deutschen Stahlindustrie in Mio. t. Blaue Linie: Schrotteinsatz der deutschen Stahlindustrie 2015 - 2023. Gestrichelte blaue Linie: durchschnittlicher Schrotteinsatz 2015 - 2023. Grüne Szenarien: Pfad 1 (hohe Rohstahlproduktion). Gelbe Szenarien: Pfad 2 (mittlere Rohstahlproduktion). Rote Szenarien: Pfad 3 (niedrige Rohstahlproduktion). Quadratische Markierungen: Pfad A (niedrige SEQ). Dreieckige Markierungen: Pfad B (mittlere SEQ). Runde Markierungen: Pfad C (hohe SEQ).
Quelle: Eigene Berechnung der Szenarien.

Abbildung 9 zeigt für das Stichjahr 2030 in fast allen Szenarien einen Anstieg des Bedarfs an hochwertigem Schrott. Nur in den Szenarien 2A (Schrottbedarf in der Primärproduktion von 4,7 Mio. t) und 3A (4,3 Mio. t) liegen die Werte unterhalb dieses Durchschnitts. Das Szenario 1C (hohe Rohstahlproduktion, hohe SEQ) impliziert dagegen einen Schrottbedarf in der Primärproduktion von 7,7 Mio. t. Dieser Wert ist etwa 60 % höher als der durchschnittliche Schrottbedarf der Hochofenroute zwischen 2015 und 2023.

Bereits im Jahr 2030 zeigt sich, dass der implizierte Bedarf an Stahlschrott für die Primärproduktion stärker von den SEQ (Pfade A, B, C) als von der Rohstahlproduktion (Pfade 1, 2, 3) bestimmt wird. Dieses Phänomen ist im Jahr 2045 noch ausgeprägter. Es kann dadurch erklärt werden, dass die Unsicherheiten über die SEQ der schrottbasierten EAF-Route und der BF-BOF-Route relativ gering sind. Die Unsicherheiten über den Schrottbedarf in der DR-EAF und DR-SAF-BOF-Route sind größer.

Im Jahr 2045 vergrößert sich die Bandbreite des Stahlschrottbedarfs für die Primärproduktion erheblich. Sie liegt zwischen 2,7 Mio. t (Szenario 3A) und 10,1 Mio. t (Szenario 1C). Falls die SEQ in den neuen Routen niedrig sein sollten, kann mit ei-

Tabelle 6
Bedarf an hochwertigem Schrott in den Szenarien

Szenario	Rohstahlproduktion	SEQ	Stichjahr 2030	Stichjahr 2045
1A	hoch	niedrig	5,0	3,9
1B		mittel	6,3	6,9
1C		hoch	7,7	10,1
2A	mittel	niedrig	4,7	3,4
2B		mittel	6,0	6,0
2C		hoch	7,4	8,8
3A	niedrig	niedrig	4,3	2,7
3B		mittel	5,4	4,8
3C		hoch	6,6	7,1

Angabe des Stahlschrottbedarfs der deutschen Stahlindustrie in Mio. t. Im Zeitraum von 2015 bis 2023 lag der durchschnittliche Schrotteinsatz in der Hochofenroute bei 4,8 Mio. t pro Jahr. Quelle: Eigene Berechnung der Szenarien.

nem Schrottbedarf für die Primärproduktion unterhalb der aktuellen Größenordnung von 4,8 Mio. t gerechnet werden.

Hohe SEQ (DR-EAF-Route 50 %, DR-SAF-BOF-Route 30 %) implizieren einen erheblichen Anstieg des Bedarfs an hochwertigem Schrott. Die eingesetzte Menge schwankt zwischen 7,1 Mio. t (Szenario 3C) und 10,1 Mio. t (Szenario 1C). Im Fall mittlerer SEQ (DR-EAF-Route 32 %, DR-SAF-BOF-Route 25 %) ist tendenziell mit einem Anstieg des Bedarfs an hochwertigem Schrott zu rechnen. Das Szenario 1B impliziert einen Schrottbedarf für die Primärproduktion von 6,9 Mio. t, das Szenario 2B von 6,0 Mio. t. Bei spürbar zurückgehender Rohstahlproduktion (Szenario 3B) besteht ein Bedarf von 4,8 Mio. t. Dies entspricht dem durchschnittlichen Bedarf in der BF-BOF-Route zwischen 2015 und 2023.

Der von den Szenarien suggerierte steigende Bedarf – gerade nach hochwertigem Schrott – erscheint aus ökonomischen wie ökologischen Gründen plausibel. Die höheren Produktionskosten der DR-Route dürften den Stahlschrotteinsatz zukünftig wirtschaftlich attraktiver machen (Prognos et al., 2021). Zudem nimmt der Metallgehalt in den geförderten Eisenerzen tendenziell ab, wodurch eine Steigerung der Gewinnungskosten und des Energieaufwands wahrscheinlich wird (Hiebel und Nühlen, 2016). Einsparungen von Energie und Ressourcen sind zusätzliche Argumente für einen gesteigerten Stahlschrotteinsatz. Auch kann der DRI-Bedarf reduziert werden, was wiederum den Bedarf an

knappem Grünem Wasserstoff verringert (Wuppertal Institut und Fraunhofer ISI, 2024).

Aufgrund der fehlenden Daten zur Verfügbarkeit von hochwertigem Schrott kann der künftige Bedarf nicht mit der aktuellen Verfügbarkeit verglichen werden. Allerdings sprechen fünf Argumente dafür, dass eine Knappheit an hochwertigem Schrott wahrscheinlicher ist als für Stahlschrott insgesamt.

Erstens deutet frühere Forschung (Hundt und Pothen, 2025) an, dass die (potenzielle) Verfügbarkeit von Altschrott in Europa steigt, während die von Kreislauf- sowie Neuschrott bestenfalls stagniert. Ein steigender Bedarf an hochwertigem Schrott trifft also auf ein Überangebot von Altschrott, der weiter aufbereitet werden muss, bevor er den Qualitätsansprüchen genügt. Inwieweit dieser Aufwand wirtschaftlich attraktiv ist, hängt vom Preis für hochwertigen Schrott ab.

Zweitens ist die Bandbreite des Bedarfs an hochwertigem Schrott groß. Im Vergleich zum durchschnittlichen Stahlschrotteinsatz in der BF-BOF-Route deuten die Szenarien eine Bandbreite zwischen -43,8 % und +109,5 % an.

Drittens suggeriert die anekdotische Evidenz, dass tendenziell minderwertiger Schrott aus Europa (z.B. nach Asien) exportiert wird. Damit wäre die potenzielle Verfügbarkeit von hochwertigem Schrott wenig größer als der bereits heute eingesetzte Anteil in der BF-BOF-Route.

Viertens wird für die Approximation unterstellt, dass die schrottbasierte EAF-Route keinen hochwertigen Schrott einsetzt. Nachfrage aus dieser Route, in Verbindung mit dem erwarteten Ausbau der EAF-Kapazitäten, würde den Bedarf weiter erhöhen.

Fünftens steigen die Ansprüche an die Reinheit von Stahlschrott möglicherweise mit der SEQ. Je höher der Anteil von Schrott am Rohstoffmix, desto geringer der Anteil von Primärrohstoffen, die etwaige Verunreinigungen ausgleichen können.

5 Fazit

Diese Studie entwickelt Szenarien, die eine plausible Bandbreite für den Stahlschrottbedarf der deutschen Stahlindustrie bis 2045 herausarbeiten. Grundlage der Szenarien sind aktuelle Studien zur Transformation der Stahlindustrie zur Klimaneutralität sowie historische Trends und Annahmen. Der Einsatz von Szenarien trägt den großen Unsicherheiten Rechnung. Der Bedarf an hochwertigem Schrott für anspruchsvolle Stähle, die heute primär in der BF-BOF-Route gefertigt werden, wird zumindest grob approximiert.

Der zukünftige Stahlschrottbedarf resultiert aus der Rohstahlproduktion, der Zusam-

mensetzung der Verfahrensrouten und deren Schrotteinsatzquoten. Dabei scheinen die zukünftigen Verfahrensrouten relativ gut vorhersehbar. Die wasserstoffbasierte Direktreduktion soll absehbar die BF-BOF-Route ablösen. Der Anteil der schrottbasierten Produktion in der EAF-Route soll moderat zunehmen. Die SEQ der etablierten BF-BOF-Route mit bis zu 20 % und der EAF-Route mit ca. 104 % sind ebenfalls relativ gut abschätzbar.

Wesentlich unsicherer sind die Entwicklung der Rohstahlproduktion sowie die SEQ der neuen DR-Routen. Diese Studie unterstellt zum Stichjahr 2030 eine Bandbreite der Rohstahlproduktion zwischen 35 Mio. t und 41 Mio. t und zum Stichjahr 2045 zwischen 28 Mio. t und 40 Mio. t. Für die DR-EAF-Route scheinen SEQ zwischen 15 % und 50 %, für die DR-SAF-BOF-Route zwischen 20 % und 30 % plausibel.

Die Szenarien liefern fünf zentrale Erkenntnisse. **Erstens** lassen die meisten Szenarien einen Anstieg des Stahlschrottbedarfs über den durchschnittlichen Stahlschrotteinsatz der Jahre 2015 bis 2023 von 17,2 Mio. t erwarten. Für das Stichjahr 2030 liegt die Bandbreite des Schrottbedarfs zwischen 17,0 Mio. t und 22,7 Mio. t, für 2045 bei 14,9 Mio. t bis 27,6 Mio. t. 2030 liegt der Schrottbedarf nur in einem Szenario unter dem historischen Durchschnitt, 2045 in zwei. Die Rohstahlproduktion ist hierbei der zentrale Faktor.

Zweitens liegt der Schrottbedarf in der Mehrzahl der Szenarien im Bereich der heutigen Verfügbarkeit. Diese lag zwischen 2015 und 2023 bei durchschnittlich 21,3 Mio. t pro Jahr. Der Bedarf überschreitet diesen Wert im Stichjahr 2030 in zwei Szenarien, im Stichjahr 2045 in drei Szenarien. Falls die Rohstahlproduktion auf ein Vor-Corona-Niveau zurückkehrt oder hohe SEQ in den neuen Verfahrensrouten eintreten, bedarf es eines zusätzlichen Schrottangebots, beispielsweise durch mehr inländisches Angebot oder durch zusätzliche Schrottimporte.

Drittens dürfte der Bedarf an hochwertigem Schrott steigen, denn die neuen Technologien zur wasserstoffbasierten Stahlherstellung erlauben einen höheren Schrotteinsatz als die BF-BOF-Route. Die Bandbreite des Bedarfs an hochwertigem Schrott liegt zum Stichjahr 2030 zwischen 4,3 Mio. t und 7,7 Mio. t, 2045 zwischen 2,7 Mio. t und 10,1 Mio. t. Zum Vergleich: von 2015 bis 2023 wurde in der BF-BOF-Route in Deutschland jährlich durchschnittlich 4,8 Mio. t Stahlschrott eingesetzt.

Viertens zeigen die Ergebnisse, dass die SEQ der neuen Technologien von erheblicher Bedeutung für den Bedarf an hochwertigen Schrotten ist. In allen Szenarien mit mittleren oder hohen SEQ ist der Bedarf mindestens so groß wie im Durchschnitt von 2015 bis 2023, selbst bei niedriger Rohstahlproduktion. In der Regel ist er erheblich größer.

Fünftens deuten die Szenarien an, dass die Verfügbarkeit von hochwertigem Schrott ein größeres Problem darstellt als die Verfügbarkeit von Stahlschrott insgesamt. Ein (sehr wahrscheinlich) deutlich steigender Bedarf trifft auf ein bestenfalls stagnierendes Angebot.

Gleichzeitig ist hervorzuheben, dass der Bedarf an (hochwertigem) Stahlschrott ein Marktergebnis ist. Die Stahlhersteller können, im Rahmen des technisch Möglichen, zwischen dem Einsatz von Schrott und DRI abwägen. Somit hängt die wirtschaftlich optimale Schrotteinsatzquote sowohl von Preis und Verfügbarkeit von Schrott als auch von Preis und Verfügbarkeit von DRI ab. Dabei spielen Faktoren wie Strom- und CO_2-Preise sowie die Verfügbarkeit von (Grünem) Wasserstoff eine Rolle bei der Abwägung.

Die Studie ermittelt plausible Bandbreiten des Stahlschrottbedarfs der deutschen Stahlindustrie. Sie unterliegt jedoch methodischen Beschränkungen, die durch weitere Forschung überwunden werden können und sollten. Die Untersuchung beschränkt sich auf den Stahlschrottbedarf der deutschen Stahlindustrie. Damit klammert sie die internationale Dimension des Stahlschrotteinsatzes (Watari et al., 2025) aus. Darüber hinaus klammert sie den Schrottbedarf der Gießereien aus. Im nächsten Schritt sollte die Betrachtung auf Europa ausgeweitet werden.

Die Stahlschrottverfügbarkeit wird in dieser Studie nicht in die Zukunft fortgeschrieben. Hundt und Pothen (2025) zeigen in ihrer Literaturauswertung, dass die (potenzielle) Verfügbarkeit von Altschrott in Europa bis 2050 moderat steigen dürfte. Gleichzeitig ist eine Verschiebung der Schrottverfügbarkeit weg von reinerem Kreislauf- und Neuschrott und hin zu Altschrott zu erwarten. Weltweit soll die verfügbare Stahlschrottmenge um ca. 70 % ansteigen. Diese Entwicklung ist vor allem auf die steigende Verfügbarkeit in China und verschiedenen Entwicklungsländern zurückzuführen (Wuppertal Institut und Fraunhofer ISI, 2024). Eine integrierte, techno-ökonomische Analyse von Angebot und Nachfrage könnte weitere Erkenntnisse liefern.

Die Definition von hochwertigem Schrott in dieser Studie stellt eine grobe Approximation realer Schrottqualitäten dar. In der Praxis orientiert sich die Diskussion um Qualität an Schrottsorten, ergänzt um weitere Faktoren wie Anhaftungen oder Kunststoffanteile. Sowohl die Verfügbarkeit als auch der Bedarf an Stahlschrotten sollte in der weiteren Forschung genauer entlang der Schrottsorten untersucht werden.

Um die notwendigen Fortschritte bei Sammlung, Sortierung und Aufbereitung von Stahlschrott (Consentec et al., 2021) zu unterstützen, sollten sowohl die Erforschung als auch die Skalierung der erforderlichen Technologien gefördert werden. Gerade die enormen

Stoffströme im Stahlrecycling benötigen einerseits automatisierte Technik für Sortierung und Aufbereitung der Rohstoffmengen, andererseits auch die Zahlungsbereitschaft für hochwertige Schrotte.

6 Danksagungen

Diese Studie baut auf der Masterarbeit von Maik Hartung am Fachbereich Betriebswirtschaft der EAH Jena unter Betreuung durch Prof. Dr. Frank Pothen auf. Die Masterarbeit wurde im Anschluss vom Autorenteam grundlegend überarbeitet, inhaltlich erweitert und für die Veröffentlichung als Diskussionspapier aufbereitet.

Die Autoren danken Roland Mauss, Tobias Aldenhoff, Gerhard Endemann, Johannas Hanke, Michael Rothgang, Jochen Dehio und Christian Klöppelt für ihr Feedback zu früheren Versionen dieser Studie. Wir bedanken uns bei Tamar Lichtman für ihre Unterstützung bei der Gestaltung der Grafiken.

7 Referenzen

ArcelorMittal (o.J.). Transformation in Deutschland. https://germany.arcelormittal.com/Dekarbonisierung/Transformation-in-Deutschland/. Zugriff: 30.04.2025.

BDSV (1995). Europäische Stahlschrottsortenliste. https://www.bdsv.org/fileadmin/service/gesetze_und_regelwerke/sortenliste_eu.pdf. Zugriff: 26.06.2025.

BDSV (2010). Stahlschrottsortenliste. https://www.bdsv.org/fileadmin/service/gesetze_und_regelwerke/sortenliste_de.pdf. Zugriff: 25.06.2025.

Boston Consulting Group (2021). *Klimapfade 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft*. Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI), Berlin.

Boston Consulting Group und IW (2024). *Transformationspfade für das Industrieland Deutschland*. Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI), Berlin.

Brandl, P., Bui, M., Hallett, J. P., und Mac Dowell, N. (2021). Beyond 90% capture: Possible, but at what cost? *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 105:103239.

Bureau of International Recycling (2014). World Steel Recycling in Figures 2010 - 2014. https://www.bir.org/images/uploads/publications/Ferrous_report_2010-2014.pdf. Zugriff: 07.05.2025.

BVSE (o.J.). Europäische Stahlschrottsortenliste. https://www.bvse.de/images/pdf/schott-elektro-kfz/schrottsorten.pdf. Zugriff: 26.06.2025.

Caviezel, C., Achternbosch, M., und Grünwald, R. (2024). *Alternative Technologiepfade für die Emissionsreduktion in der Grundstoffindustrie*. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin.

Consentec, Fraunhofer ISI, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, und Technische Universität Berlin (2021). *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul Industriesektor*. Fraunhofer ISI, Berlin.

Cooper, D. R., Ryan, N. A., Syndergaard, K., und Zhu, Y. (2020). The potential for material circularity and independence in the U.S. steel sector. *Journal of Industrial Ecology*, 24(4):748–762.

DERA (2024). Recyclingatlas für die Metallerzeugung. Eisen - Factsheet. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/factsheet_Fe_24.pdf;jsessionid=FB440074781FE30448E5E37D2F7363A6.internet951?__blob=publicationFile&v=1. Zugriff: 20.04.2025.

Doyle, A. und Voet, T. (2021). The DRI dilemma: Could raw material shortages hinder the steel industry's green transition? https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-dri-dilemma-could-raw-material-shortages-hinder-the-steel-industrys-green-transition.

Dworak, S., Rechberger, H., und Fellner, J. (2022). How will tramp elements affect future steel recycling in Europe? – A dynamic material flow model for steel in the EU-28 for the period 1910 to 2050. *Resources, Conservation and Recycling*, 179:106072.

EWI, ef.Ruhr, und Universität zu Köln (2021). *dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität: Klimaneutralität 2045 - Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems*. Deutsche Energie-Agentur, Berlin.

Günther, E. (2018). Szenarien. https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/szenarien-53735/version-276803. Zugriff: 30.04.2025.

Hartbrich, I. (2022). Umbau in der Stahlindustrie. https://www.vdi-nachrichten.com/technik/produktion/umbau-in-der-stahlindustrie/. Zugriff: 05.05.2025.

Hiebel, M. und Nühlen, J. (2016). *Technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Faktoren von Stahlschrott (Zukunft Stahlschrott).* Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen.

Hundt, C. und Pothen, F. (2025). European Post-Consumer Steel Scrap in 2050: A Review of Estimates and Modeling Assumptions. *Recycling*, 10(1).

Hunecke, M. (2024). Revolution in der Stahlherstellung. https://betop.friedhelm-loh-group.de/praxis/revolution-in-der-stahlherstellung.html. Zugriff: 20.09.2024.

Hüttenwerke Krupp Mannesmann (2023). Dekarbonisierung H2KM. https://www.hkm.de/dekarbonisierung. Zugriff: 05.05.2025.

Kleier, T. (2023). Innovationen auf dem Weg zu grünem Stahl. https://www.sms-group.com/de-de/insights/all-insights/innovationen-auf-dem-weg-zu-gruenem-stahl. Zugriff: 05.05.2025.

Kopernikus-Projekt Ariadne (2021). *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045: Szenarien und Pfade im Modellvergleich.* Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bonn.

Küster Simic, A., Knigge, M., und Schönfeldt, J. (2020). Struktur, Entwicklung und Zukunft der deutschen Stahlindustrie - Eine Branchenanalyse. *Forschungsförderung Working Paper*, 187.

Küster Simic, A. und Schönfeldt, J. (2022). H2-Transformation der Stahlindustrie und des Energieanlagenbaus. *Forschungsförderung Working Paper*, 260.

Lüngen, H. B. (2021). Wege zur Minderung von CO2-Emissionen in der Eisen- und Stahlindustrie in Europa. https://vdeh.de/media/2021-03-30_luengen_wege_zur_minderung_von_co2-emissionen.pdf. Zugriff: 05.05.2025.

Maga, D., Hiebel, M., Nühlen, J., Gaikwad, A., und Wu, Z. (2022). *Calculation greenhouse gas balance of stainless steel recycling of the Oryx Stainless Group. Oryx greenhouse gas balance for 2021.* Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen.

Meinert, S. und Stollt, M. (o.J.). Was sind Szenarien? https://www.mitbestimmung.de/html/was-sind-szenarien-3515.html. 06.05.2025.

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2023). Milliarden-Investitionen durch Land und Bund – für Grünen Stahl aus Niedersachsen. https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/pressemitteilungen/pi-029-besuch-salzgitter-220629.html. Zugriff: 06.05.2025.

Oda, J., Akimoto, K., und Tomoda, T. (2013). Long-term global availability of steel scrap. *Resources, Conservation and Recycling*, 81:81–91.

Panasiuk, D., Daigo, I., Hoshino, T., Hayashi, H., Yamasue, E., Tran, D. H., Sprecher, B., Shi, F., und Shatokha, V. (2022). International comparison of impurities mixing and accumulation in steel scrap. *Journal of Industrial Ecology*, 26(3):1040–1050.

Pauliuk, S., Milford, R. L., Müller, D. B., und Allwood, J. M. (2013). The steel scrap age. *Environmental Science & Technology*, 47(7):3448–3454.

Prognos, Öko-Institut, und Wuppertal Institut (2021). *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann.* Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende, Berlin.

Prognos und Wuppertal Institut (2022). *Optionen für eine klimaneutrale und nachhaltige Grundstoffindustrie in Deutschland.* Deutschen Bundestag, Berlin.

Saarstahl (2022). Nachhaltige Stahlproduktion. `https://www.saarstahl.com/sag/de/konzern/verantwortung/nachhaltigkeit/nachhaltige-stahlproduktion/index.shtml`. Zugriff: 19.10.2024.

Salzgitter (2023). Salzgitter AG sichert mit Zustellung von Hochofen A die Roheisenbasis in der Transformationsphase ab. `https://www.salzgitter-ag.com/de/newsroom/pressemeldungen/details/salzgitter-ag-sichert-mit-zustellung-von-hochofen-a-die-roheisenbasis-in-der-transformationsphase-ab-20964.html`. Zugriff: 06.05.2024.

Salzgitter (o.J.). SALCOS. `https://salcos.salzgitter-ag.com/de/`. Zugriff: 06.05.2025.

Siebel, T. (2024). Deutsche Stahlproduktion 2023 auf Tiefstand gesunken. `https://www.springerprofessional.de/metalle/produktion---produktionstechnik/deutsche-stahlproduktion-2023-auf-tiefstwert-gesunken/26660696`. Zugriff: 05.06.2025.

Stahl-Holding-Saar (o.J.). Green Steel: Strategie zur Dekarbonisierung. `https://www.renn-netzwerk.de/fileadmin/user_upload/west/docs/WinterSchool_-_Modul_2_-_Green_Steel_vf.pdf`. Zugriff: 06.05.2025.

Stahlinstitut VDEh (o.J.). Kohlenstoffbasierte Stahlerzeugung. `https://vdeh.de/der-werkstoff/stahlherstellung/kohlenstoffbasierte-stahlerzeugung/`. Zugriff: 06.05.2025.

thyssenkrupp (2021). Modernisierter Hochofen „Schwelgern 1“ produziert wieder. `https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/newsroom/pressemitteilungen/modernisierter-hochofen-schwelgern-1-produziert-wieder.html`. Zugriff: 06.05.2025.

thyssenkrupp (2024). thyssenkrupp Steel stellt wesentliche Eckpunkte für industrielles Zukunftskonzept vor. `https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/newsroom/pressemitteilungen/thyssenkrupp-steel-stellt-wesentliche-eckpunkte-fuer-industrielles-zukunftskonzept-vor.html`. Zugriff: 15.05.2025.

thyssenkrupp (o.J.). thyssenkrupp Steel Europe startet die grüne Transformation in Duisburg. `https://transformation.thyssenkrupp-steel.com/`. Zugriff: 06.05.2025.

Watari, T., Fishman, T., Wieland, H., und Wiedenhofer, D. (2025). Global stagnation and regional variations in steel recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 220:108363.

Watari, T. und Yokoi, R. (2021). International inequality in in-use metal stocks: What it portends for the future. *Resources Policy*, 70:101968.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2017). *Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland.* Wirtschaftvereinigung Stahl.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2021). *Stahlschrott-Außenhandel. Statistischer Bericht 2021.* Wirtschaftsvereinigung Stahl.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2022). *Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2022*. Wirtschaftsvereinigung Stahl.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2023a). *Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2023*. Wirtschaftsvereinigung Stahl.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2023b). *Stahlschrott-Außenhandel. Statistischer Bericht 2023*. Wirtschaftsvereinigung Stahl.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024a). *Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2024*. Wirtschaftsvereinigung Stahl.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024b). *Stahlschrott-Außenhandel. Statistischer Bericht 2024*. Wirtschaftsvereinigung Stahl.

World Steel Association (2021). Life cycle inventory (LCI) study. 2021 data release. `https://worldsteel.org/wp-content/uploads/2021-LCA-Study-Report.pdf`. Zugriff: 30.04.2025.

World Steel Association (2024). *World Steel in Figures 2024*. World Steel Association.

Wuppertal Institut und Fraunhofer ISI (2024). *Dekarbonisierung der industriellen Produktion (DekarbInd)*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Wuppertal Institut und IW (2023). *Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2045. Ein Szenario aus dem Projekt SCI4climate.NRW*. Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

A Zukunftskonzepte der Primärstahlproduzenten

Die in den Studien (vgl. Tabelle 1) gemachten Angaben werden anhand von Projektankündigungen und Transformationsplänen der Primärstahlproduzenten plausibilisiert. Diese Ankündigungen spiegeln den Stand vom Dezember 2024 wider. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Transformationspläne der sechs großen deutschen Primärstahlproduzenten (Salzgitter AG, ArcelorMittal, thyssenkrupp, HKM, Dillinger und Saarstahl) betrachtet.

thyssenkrupp will bis 2045 die Netto-Null der THG-Emissionen erreichen. Das Unternehmen hat das Ziel, bis dahin alle vier Hochöfen durch DR-Anlagen zu ersetzen (thyssenkrupp, o.J.). Die letzte Neuzustellung der Unternehmensgeschichte wurde 2021 vollzogen (thyssenkrupp, 2021). Die erste DR-Anlage soll im Jahr 2027 in Betrieb gehen. Sie soll eine Kapazität von 2,5 Mio. t DRI haben. Das Unternehmen verfolgt dabei als einziger Primärstahlproduzent in Deutschland die Strategie der DR-SAF-BOF-Route (thyssenkrupp, o.J.). Im Zuge der Fertigstellung soll der kleinste der vier Hochöfen stillgelegt werden. Bis 2030 soll ein zweiter, deutlich größerer Hochofen folgen. Das soll die THG-Emissionen um mindestens 30 % senken (Hartbrich, 2022).

ArcelorMittal hat sich das Ziel gesetzt, die THG-Emissionen bis 2030 um 35 % zu senken und bis 2050 komplett zu vermeiden. Das Unternehmen plant dafür eine weitere DR-Anlage am Standort Hamburg und die bestehende stetig mit mehr Wasserstoff zu betreiben. Am Standort Bremen soll der Hochofen durch eine DR-Anlage ersetzt werden. Ebenfalls ist der Bau von zwei EAFs geplant, die aus Schrott und DRI Rohstahl produzieren. Auch in Eisenhüttenstadt sollen zwei EAFs entstehen, die anfangs mit DRI aus Bremen beliefert werden sollen. Zudem ist ein EAF in Duisburg geplant; dieser soll zukünftig mit DRI aus Hamburg versorgt werden (ArcelorMittal, o.J.).

Salzgitter strebt bis 2033 eine Einsparung von 95 % der THG-Emissionen an. Das soll durch Direktreduktion, anfangs mit Erdgas und später mit Wasserstoff, erfolgen (Salzgitter, o.J.). Das Unternehmen setzt dabei auf die DR-EAF-Route. Zunächst ist eine Anlage mit einer Kapazität von rund 1,9 Mio. t Rohstahl geplant (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, 2023). Die Bauarbeiten haben bereits begonnen und die Anlage soll 2026 in Betrieb gehen. Damit wird ca. ein Drittel der Gesamtkapazität auf dieses Verfahren umgestellt (Salzgitter, 2023). Das Unternehmen plant, bis 2033 alle drei Hochöfen durch die DR-EAF-Route zu ersetzen (Hunecke, 2024).

Langfristig liegt der Fokus der Hüttenwerke Krupp Mannesmann auf einer wasserstoff-

basierten Rohstahlproduktion. Bis einschließlich 2025 findet zunächst jede Form der Minderung von THG-Emissionen im bestehenden Anlagenpark statt. Das Unternehmen nennt hier Maßnahmen wie eine Erhöhung der SEQ oder den Einsatz wasserstoffhaltiger Gase im Hochofen. Bis 2045 sollen beide Hochöfen auf Anlagen mit alternativen Reduktionstechnologien mit Wasserstoff als Reduktionsmittel umgestellt werden. Konkrete Angaben in Bezug auf das zukünftig eingesetzte Verfahren unterbleiben dabei (Hüttenwerke Krupp Mannesmann, 2023).

Die Unternehmen Dillinger und Saarstahl können gemeinsam betrachtet werden, da das Roheisen für beide Unternehmen in den Hochöfen der Dillinger Hütte produziert wird. Das Unternehmen hat das Ziel, seine beiden Hochöfen bis 2035 außer Betrieb zu nehmen. Der erste Hochofen soll bis 2027/2028 durch eine wasserstoffbetriebene DR-Anlage ersetzt werden. Der zweite soll bis spätestens 2035 außer Betrieb gehen (Stahl-Holding-Saar, o.J.). Zusätzlich soll DRI aus den eigenen französischen Werken zugekauft werden (Saarstahl, 2022). Auch hier soll das DRI im EAF zu Rohstahl weiterverarbeitet werden (Stahl-Holding-Saar, o.J.).