

Zur Substituierbarkeit des DRI-Einsatzes in der Qualitätsstahlherstellung durch intensivierete Nutzung von Altschrott

Impressum

Zur intensivierten Altschrottnutzung in der Qualitätsstahlherstellung

Projektleitung

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Johannes Eckstein, johannes.eckstein@isi.fraunhofer.de

Verantwortlich für den Inhalt des Textes

Oliver Lösch, ITEP GmbH Industrial Transformation – Energy Technology and Policies
o.loesch@itep-policies.de

Zitierempfehlung

Lösch, O. (2026): Zur Substituierbarkeit des DRI-Einsatzes in der Qualitätsstahlherstellung durch intensivierte Nutzung von Altschrott. Landau in der Pfalz: ITEP GmbH Industrial Transformation – Energy Technology and Policies

Veröffentlicht

Mai 2026

Acknowledgement

Der Autor bedankt sich bei Bennet Weiss und Dr. Jakob Dürrwächter vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) für die erforderlichen Modifikationen des Modells CaCoCa und die Abstimmungen hierzu, die den Einsatz des Modells für die techno-ökonomische Analyse in dieser Studie ermöglicht haben.

Förderung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Vorhabens WinIt (FKZ 03KSVF10A-B) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	4
2	Hintergrund.....	7
2.1	Dekarbonisierung der Stahlindustrie.....	7
2.2	Entwicklung des Stahl- und Stahlschrottmarkts.....	8
3	Zielsetzung.....	15
4	Technische Herausforderungen und Lösungen für die intensivierte Altschrottnutzung in der Stahlherstellung.....	16
4.1	Begleitelemente als zentrale Herausforderung für die Altschrottnutzung.....	16
4.2	Status Quo der Schrottaufbereitung.....	17
4.3	Technische Lösungen zur Optimierung der Schrottaufbereitung.....	17
4.3.1	Sensorgestützte Sortiertechniken.....	18
4.3.2	Metallurgische Ansätze zur Aufbereitung von Stahlschrotten.....	30
5	Techno-ökonomischer Vergleich von Stahlprozessen mit und ohne Altschrottnutzung, Substitutionspotenzial.....	33
6	Betrachtung von Produkthanforderungen.....	38
7	Einordnung in den energie- und klimapolitischen Kontext.....	41
8	Handlungsansätze und weitere Forschungsfragen.....	48
9	Anhang: Inputdaten für die techno-ökonomische Analyse und detaillierte Ergebnisse.....	51
10	Abbildungsverzeichnis.....	54
11	Tabellenverzeichnis.....	55
12	Literaturverzeichnis.....	56

1 Zusammenfassung

Kontext und Zielsetzung

Die Stahlindustrie ist für rund 7–8 % der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Ihre Dekarbonisierung ist unverzichtbar für die Erreichung der Klimaschutzziele; dies gilt insbesondere für die emissionsintensive Primärstahlerzeugung. Technologisch ist der Weg hier weitgehend geklärt: Die emissionsintensive Hochofen-Konverter-Route (BF/BOF) wird schrittweise durch die Direktreduktion gekoppelt mit dem Elektrolichtbogenofen¹ (DR/EAF) ersetzt. Diese Route bietet mehrere Flexibilitätäten: sie kann einerseits Erdgas und Wasserstoff als Energieträger und Reduktionsgas, und andererseits direkt reduziertes Eisen (DRI) und Stahlschrott als Eisenträger in beliebigem Verhältnis – von 0 bis 100 % – einsetzen.

Die vorliegende Studie untersucht, inwieweit aufbereiteter Altschrott (post-consumer scrap) in der zukünftigen Primärstahlproduktion in der DR/EAF-Route als Eisenträger eingesetzt werden kann, um den Einsatz von DRI/HBI und damit den Wasserstoffbedarf der Industrietransformation zu reduzieren. Sie verbindet eine technische Analyse der Aufbereitungsverfahren mit einer techno-ökonomischen Bewertung und einer Einordnung in den energie- und klimapolitischen Kontext.

Ausgangslage: Wachsende Altschrottüberschüsse und Hemmnisse für deren Einsatz

In der EU stehen derzeit rund 20 Mio. t Altschrott jährlich als Überschussmenge zur Verfügung, die überwiegend exportiert werden – insbesondere in die Türkei. Bis 2050 wird ein Anstieg der intern nicht verwendeten Überschüsse auf rund 43 Mio. t erwartet (Dworak et al., 2022). Global prognostiziert die OECD eine Verdopplung der aktuell verfügbaren Schrottmengen auf über 1.200 Mio. t bis 2050 (Corneille & Agrawal, 2024).

Diese Mengen können mit dem bestehenden Schrotthandling nicht als Eisenträger für hochwertige Primärstahlgüten eingesetzt werden. Denn Altschrott enthält Begleitelemente – insbesondere Kupfer (Cu), Molybdän (Mo), Chrom (Cr), Nickel (Ni) und Zinn (Sn) –, die die geforderten Grenzwerte für anspruchsvolle Flachstahlgüten, wie sie beispielsweise für den Automobilbau benötigt werden, regelmäßig überschreiten. Kupfer ist besonders relevant: Es führt zu Warmbrüchigkeit des Stahls und reduziert dessen Tiefziehfähigkeit. Der Anteil von Kupfer in Automobil-Schredderschrotten steigt durch den Trend zur Elektromobilität tendenziell weiter an.

Technische Lösungsansätze: Sensorgestützte Sortierung als vielversprechende Option

Entlang der Altschrott-Wertschöpfungskette gibt es drei Interventionspunkte: Schrottsammlung, Aufbereitung durch Recycler und metallurgische Behandlung im Stahlwerk. Diese Studie fokussiert auf technische Lösungen bei Recycling und Schrottnutzung.

Sensorgestützte Sortierverfahren stellen den kurz- bis mittelfristig vielversprechendsten Ansatz dar. Die Kombination von LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) als Elementanalyse-Verfahren mit XRF/XRT-Vorsortierung bietet die bisher überzeugendsten Ergebnisse. LIBS ermöglicht als einzige Methode eine quantitative, legierungsspezifische Elementanalyse (Sensitivitätsgrenze ~0,05 wt.-% für Kupfer). Multisensorische Systeme, die LIBS mit XRF, LiDAR, RGB-Kameras und KI-gestützter Klassifikation kombinieren, befinden sich in fortgeschrittener Entwicklung (TRL 5–7 für Teilsysteme). Auch Systeme auf XRT oder XRF-Basis ohne LIBS befinden sich in Entwicklung.

¹ Oder mit einem anderen Schmelzaggregat

Auf nationaler Ebene hat die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) mit den aufeinander aufbauenden Vorhaben COLA I-II, HILDE und ready2sort (2014–2023) eine technologische Entwicklungslinie vom Labornachweis bis zur Marktreife begleitet. Auf EU-Ebene laufen mit CAESAR, PURESCRAP, HIYIELD, MEDALS und CiSMA mehrere umfangreiche Horizon-Vorhaben (Fördervolumen je 4–8 Mio. €) unter Beteiligung von Stahlherstellern wie ArcelorMittal, voestalpine und SSAB. Zwar gibt es bereits ein kommerziell skaliertes Marktangebot für sensorgestützte Sortiersysteme im Metallrecycling. Diese Systeme (beispielsweise von cleansort, TOMRA, Steinert, Binder+Co) werden aktuell allerdings primär für die Aluminiumschrottsortierung vermarktet und eingesetzt.

Zwar gibt es grundsätzlich eine Reihe metallurgischer Ansätze und Verfahren zur Entfernung von Begleitelementen aus dem Schrott oder der Stahlschmelze (Vakuumdestillation, Sulfid-Schlackeverfahren, Leaching), diese weisen allerdings entweder sehr hohe Energiebedarfe, geringe technische Reife oder prohibitiv hohe Kosten auf und sind daher für Massentähle auf absehbare Zeit nicht realistisch.

Techno-ökonomische Bewertung: erheblicher Kostenvorteil des Schrotteinsatzes

Die techno-ökonomische Analyse vergleicht vier Produktionsrouten – BF/BOF-Referenz, H₂-DR/EAF mit 100 % DRI, 50 % Schrott / 50 % DRI sowie 100 % Schrott – für den Zeitraum 2025–2045. Kernergebnis:

- Kostendifferenz 2045: rund 250 €/t Rohstahl zugunsten der reinen Schrottroute gegenüber der H₂-DR/EAF-Route ohne Schrotteinsatz (ca. 36 % der Gesamtproduktionskosten)
- Zusätzliche OPEX Sortiertechnik: ~2 €/t Sortiergut (~8 kWh/t für Strom) – vernachlässigbar im Vergleich zum Produktionskostenvorteil

Die zusätzlichen CAPEX für die Sensortechnik sind jedoch nicht bekannt und konnten hier nicht berücksichtigt werden. Es erscheint allerdings plausibel, dass die Kostendifferenz von 250€/t Rohstahl deutlich ausreicht, um die zusätzlichen CAPEX zu decken und zugleich einen wirtschaftlichen Anreiz für die Altschrottaufbereitung und -nutzung zu setzen.

Die Ergebnisse sind sensitiv gegenüber CO₂-Preisen, Wasserstoffpreisen und dem regulatorischen Rahmen (CBAM, freie Allokation). Sollte die freie EUA-Allokation über 2034 hinaus fortgesetzt werden, verschlechtert sich der Business Case der DR/EAF-Routen gegenüber der BF/BOF-Referenz.

Eine erste Abschätzung des Substitutionspotenzials ergibt: Wenn im Jahr 2050 50 % der für diesen Zeitpunkt geschätzten EU-Altschrottüberschüsse (~40 Mio. t) zur Primärstahlherstellung genutzt würden, ließen sich jährlich rund 4,2 TWh Strom und 1,42 Mio. t Wasserstoff einsparen – Größenordnungen, die auch aus Perspektive der Infrastrukturplanung relevant sind.

Diese Abschätzung berücksichtigt allerdings keine denkbaren Sekundäreffekte in Drittstaaten durch eine mögliche Verringerung von Schrottexporten.

Politischer Kontext: Entwicklung des regulatorischen Rahmens

Der bestehende Policy-Rahmen adressiert die Thematik zunehmend und zeigt eine dynamische Entwicklung, setzt aber bislang keine expliziten wirtschaftlichen Anreize oder regulatorische Vorgaben für den Einsatz von aufbereitetem Altschrott in der Primärstahlherstellung:

- Das ETS I setzt durch die Definition des Hot Metal Benchmarks keine schrottspezifischen Zusatzanreize. Ein teilweise geforderter "Schrottbonus" über die freie Allokation erscheint allerdings auch konzeptionell nicht zielführend (CL-Schutzregime, kein Anreizinstrument) und mit dem laufenden CBAM-Phase-In inkompatibel.

- Der ESPR-Arbeitsplan 2025–2030 kündigt einen delegated act für Stahlprodukte noch für 2026 an. Dieser soll laut Steel and Metals Action Plan der EU explizit Anforderungen zur Kupferabtrennung aus Stahlschrott adressieren.
- Der Industrial Accelerator Act (IAA-Proposal) verankert in Erwägungsgrund 22 einen sliding-scale Ansatz für die Produktklassifikation von Stahl im Kontext der Ausgestaltung von grünen Leitmärkten, der nach Schrottanteil differenziert. Dieser Ansatz ist konzeptionell weit entwickelt (siehe „LESS“), wird aber zwischen verschiedenen Stakeholdern auch kontrovers diskutiert (Kritik: Fehlanreize für höheren Schrotteinsatz).
- Die neue Abfallverbringungsverordnung (WSR) könnte ab 2027 Schrottexporte in Nicht-OECD-Staaten erschweren, die Auswirkungen in der Praxis sind noch unklar. Explizite Exportrestriktionen für Stahlschrott sind in der EU in Diskussion, aber noch nicht beschlossen. Dieser Ansatz wird sehr kontrovers diskutiert.
- Die politisch geeinte, zum Zeitpunkt der Studie aber noch nicht verabschiedete End-of-Life Vehicles Regulation (ELVR) schafft eine Ermächtigungsgrundlage für delegated acts (Art. 6 Abs. 6) für verpflichtende Rezyklat-Quoten für Stahl in Neufahrzeugen. Diese könnten potenziell erhebliche Wirkung für die Nachfrage nach aufbereitetem Altschrott mit sich bringen, die potenzielle Ausgestaltung – und wann mit einem solchem delegated act zu rechnen wäre – ist allerdings derzeit noch völlig offen.

Zentrale Schlussfolgerungen

Die verstärkte Aufbereitung und Nutzung von Altschrott als Eisenträger in der Primärstahlproduktion ist als No-regret-Option einzustufen: Sie ist technisch prinzipiell lösbar, wirtschaftlich absehbar attraktiv und fügt sich in mehrere übergeordnete Politikziele ein (Circular Economy, Ressourceneffizienz, Dekarbonisierung der Industrie, Resilienz). Entscheidende Hebel sind:

- Skalierung und Marktdiffusion sensorgestützter Sortiertechnik (z.B. LIBS/XRF-Kombination) spezifisch für die Nutzung auf dem Stahl-/Stahlschrottmarkt
- Standardisierung aufbereiteten Altschrotts als zertifiziertes Inputmaterial für Qualitätsstahl – Voraussetzung für Marktliquidität und regulatorische Anforderungen.
- Konsistente Gestaltung des Regulierungsrahmens: Produkthanforderungen (z.B. über ESPR), Klassifikationssystem (wie im IAA-Proposal gefordert) und mögliche ELVR-Quoten sollten aufeinander abgestimmt werden, um Widersprüche und Fehlanreize zu vermeiden.
- Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere zur (potenziellen) Entwicklung der globalen Handelsstruktur von Stahlschrotten (mögliche Substitutionseffekte in heutigen Importländern) sowie zur detaillierten Kostenabschätzung der Schrottaufbereitungstechnik je nach erforderlicher Output-Qualität

2 Hintergrund

Kontext der vorliegenden Untersuchung sind zum einen die erforderliche Dekarbonisierung der Stahlindustrie vor dem Hintergrund der Klimaschutzziele, zum anderen eine stärkere Nutzung von sekundären Eisenträgern in Form von Stahlschrott zur Reduktion der Nutzung primärer Eisenträger.

2.1 Dekarbonisierung der Stahlindustrie

Die globale Stahlindustrie ist einerseits für ca. 7-8 % der globalen THG-Emissionen verantwortlich (Sustainability Indicators Report 2025, 2026), andererseits steht sie als zentrale Grundstoffindustrie Teil vieler Wertschöpfungsketten des verarbeitenden Gewerbes (z.B. Automobil, Maschinen und Anlagen, Infrastruktur). Die Dekarbonisierung der Stahlindustrie ist daher ein zentrales Thema der Industrietransformation.

Es kann grob zwischen zwei mengenmäßig dominierenden Prozessrouten unterschieden werden: der Erzeugung von qualitativ hochwertigen Stahlgütern auf Basis der integrierten Hochofenroute (BF/BOF-Route²), sowie der Erzeugung von einfacheren Stahlgütern auf der Basis von Stahlschrott (Sekundärroute).

Entscheidend ist hierbei die für die zu erzeugenden Stahlgütern geforderte chemische Zusammensetzung des Stahls, durch welche die Werkstoffeigenschaften determiniert werden. Einfachere Stahlgütern, wie sie insbesondere im Hoch- und Tiefbau zum Einsatz kommen (Spundwände, Armierungsstahl, etc.), erlauben eine größere Bandbreite an Fremdelementen im Stahl. Für hochwertigere Stahlgütern hingegen, die sich durch streng genormte Werkstoffeigenschaften auszeichnen, ist Sicherheit über die im Stahl vorliegenden Mengen an Legierungs- und Fremdelementen wesentlich entscheidender.

Die beiden genannten Prozessrouten unterscheiden sich auch erheblich mit Blick auf ihre Emissionen und die technischen Optionen zur Dekarbonisierung. Die Sekundärroute beruht auf der Nutzung eines Elektrolichtbogenofens (EAF³), der im Wesentlichen mit Strom betrieben wird (sowie mit einem geringen Anteil Erdgas für Erdgasbrenner), sowie Stahlschrott als Eisenträger. Die BF/BOF-Route hingegen nutzt Eisenerz als Eisenträger, das zunächst reduziert werden muss. Dies geschieht im Hochofen mit Koks und Kohle, die zugleich auch Energieträger für den Prozess sind. Das flüssige Roheisen wird anschließend im Sauerstoffkonverter zu Rohstahl verarbeitet und ggf. in der Sekundärmetallurgie unter anderem mit Legierungselementen versehen, je nach gewünschter Stahlsorte. Aus der erforderlichen Reduktion des Eisenerzes und der Nutzung von Kohlenstoff hierfür resultiert eine hohe Emissionsintensität der BF/BOF-Route. Die Sekundärroute hingegen nutzt bereits reduzierte Eisenträger und Strom. Die hohen Emissionen der BF/BOF-Route sind daher vor allem im Prozess selbst entstehende Scope 1 – Emissionen, während die Emissionen der Sekundärroute überwiegend durch den Strombezug entstehen und auch dort zu verorten sind (Scope 2).

Aktuell werden 70,4 % der weltweiten Stahlproduktion über die BF/BOF-Route produziert, mit einem durchschnittlichen spezifischen CO₂-Ausstoß von 2,66 t CO₂ pro Tonne Rohstahl (Scope 1,2,3)⁴. 29,1 % der weltweiten Stahlproduktion werden über EAF-Routen produziert, neben der bereits erwähnten Sekundärroute auf Schrottbasis schließt dies auch die DRI-EAF-Route ein, siehe

² BF= Blast Furnace = Hochofen; BOF = Basic Oxygen Furnace = Sauerstoffkonverter

³ EAF = Electric Arc Furnace = Elektrolichtbogenofen

⁴ Einschließlich 0,09 t/t scope-1 Emissionen durch Methan und Lachgas sowie 0,23 t/t scope 3 Emissionen (mining) durch Methan und Lachgas

unten. Die durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen der Sekundärroute liegen bei 0,71⁵ t CO₂ pro Tonne Rohstahl (Scope 1,2,3). Die genannten spezifischen Emissionen sind global in den letzten zehn Jahren nahezu unverändert (Sustainability Indicators Report 2025, 2026; World Steel in Figures 2025, o. J.).

Die Struktur der deutschen Stahlproduktion entspricht mit 70,9 % BF/BOF und 29,1 % EAF-Routen nahezu exakt der globalen Struktur. Betrachtet man jedoch die EU-27, ergibt sich ein etwas anderes Bild: 55,6 % BF/BOF und 44,4 % EAF-Routen (World Steel in Figures 2025, o. J.).

Die Emissionskennwerte verdeutlichen, dass die Primärstahlproduktion über die BF/BOF-Route, und hier insbesondere der Hochofen, entscheidend ist für die Emissionen der Stahlindustrie und daher der zentrale Ansatzpunkt für die Dekarbonisierung. Technologisch ist der Weg geklärt: die BF/BOF-Route wird durch die DR/EAF-Route ersetzt werden, wobei DR = direct reduction = Direktreduktion ein Gas-Gegenstromverfahren ähnlich dem Hochofen ist, es kommen jedoch als Reduktionsmittel für das Eisenerz Erdgas und/oder Wasserstoff zum Einsatz und die Reduktion des Eisens erfolgt im festen Aggregatzustand. Der Global Steel Transformation Tracker von Agora Industry (Agora Industry, 2023) zeigt sehr klar, dass Stahlhersteller weltweit bei geplanten Kapazitätsubauten stark auf DRI⁶ (Erdgas und Wasserstoff) und EAF-Anlagen setzen. Weitere technologische Optionen, wie die beiden bekannten elektrolytischen Verfahren mit geringer Technikreife⁷ oder auch Verfahren unter Nutzung von carbon capture, spielen bei den konkreten Planungen der Unternehmen nur eine untergeordnete Rolle. Die DR/EAF-Route ist darüber hinaus – allerdings ausschließlich mit 100% Erdgas betrieben – bereits Stand der Technik und wird an einigen Standorten weltweit betrieben.

Sowohl in der etablierten BF/BOF-Route, als auch in der DR/EAF-Route kann Stahlschrott als Eisenträger zum Einsatz kommen und andere Eisenträger ersetzen, jedoch unterscheiden sich die Einsatzmöglichkeiten deutlich. In der BF/BOF-Route wird Schrott im Konverter zum Frischen (herunterkühlen/temperieren) der Stahlschmelze eingesetzt, üblicherweise zu 10 – 25% des Eisenträgerinputs (Bartos & Stahlinstitut VDEh, 2015). Im EAF hingegen kann grundsätzlich sowohl DRI (oder die lager- und handelsfähige Variante HBI⁸) als auch Schrott in Anteilen von jeweils 0 bis 100 % als Eisenträger eingesetzt werden (Arun et al., 2024).

Diese technologische Flexibilität der DR/EAF-Route bzgl. des Eisenträgereinsatzes, sowie die im Folgenden dargestellten Entwicklung der Stahl- und Stahlschrottmärkte, insbesondere der Altschrottmengen, ist zentraler Ansatzpunkt für diese Untersuchung.

2.2 Entwicklung des Stahl- und Stahlschrottmarkts

Stahl

Die globale Rohstahlproduktion hat sich von 2000 bis 2020 mehr als verdoppelt und ist seitdem mit leichten Schwankungen stabil bei einer Größenordnung von ca. 1.900 Mio. t Stahl. Für den enormen Aufwuchs seit 2000 ist insbesondere China verantwortlich: mit ca. 1.000 Mio. t Stahl pro Jahr stammt etwas mehr als die Hälfte der globalen Stahlproduktion aus China (World Steel in Figures 2025, o. J.). Die Produktion sowohl in der EU als auch in Deutschland ist, nach langen Jahren der Stabilität, aktuell rückläufig. Von ca. 150 Mio. t bis 2020 ist die Produktion der EU auf aktuell

⁵ Einschließlich 0,03 t/t Upstream scope 3 Emissionen

⁶ DRI = direct reduced iron = direktreduziertes Eisen, das Produkt der Direktreduktion / des Schachtofens, und Vorprodukt für die Stahlherstellung im EAF.

⁷ Dies sind: MOE = molten oxide electrolysis; AEL = alkaline electrolysis

⁸ HBI = hot briquetted iron = nach der Reduktion heiß brikettiertes DRI, das durch das verbesserte Volumen/Oberflächenverhältnis lagerfähig und handelbar wird

(2024) ca. 130 Mio. t zurückgegangen (European Steel in Figures 2025, 2025), in Deutschland von einem Niveau von 42 – 44 Mio. t bis 2018 auf aktuell (2023) nur noch 35,4 Mio. t (Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2024, 2024). Die Problematik der chinesischen Überkapazitäten und des hierdurch verursachten Drucks auf den Weltmärkten ist seit langem Gegenstand industrie- und handelspolitischer Debatten und Maßnahmen.

Die OECD rechnet trotz der aktuellen Überkapazitäten mit einer weiter zunehmenden Stahlproduktion bis 2050. Für 2040 wird eine Stahlproduktion von 2.125 Mio. t, und für 2050 von 2.265 Mio. t projiziert. Dabei zeigt sich ein strukturell uneinheitliches Bild: die Erzeugung der BRICS-Staaten bleibt insgesamt konstant, jedoch mit deutlich sinkenden Produktionsmengen in China und steigender Produktion in Indien. Ein Netto-Wachstum wird insbesondere in den ASEAN und MENA-Staaten, d.h. in Staaten mit noch hohem ökonomischen Nachholbedarf bzw. Entwicklungspotenzial, gesehen. Die Produktion der OECD-Staaten bleibt insgesamt ebenfalls ungefähr konstant, mit sinkender Produktion in der EU, Japan, und Korea und steigender Produktion in der Türkei, Australien, USA, Kanada, und Mexiko. (Corneille & Agrawal, 2024)

Stahlsorten

Stahl ist ein äußerst vielfältiger Werkstoff, der sich insbesondere dadurch auszeichnet, dass sich die Anwendungseigenschaften des Stahls durch verschiedene Verfahren, insbesondere durch Legierung mit anderen Stoffen und Wärmebehandlung sowie mechanischer Verfahren wie Walzen, in einer großen Bandbreite gezielt beeinflussen lassen. Es kann zwischen legierten und unlegierten Stählen unterschieden werden, zwischen Qualitäts- und Edelstählen sowie nichtrostenden Stählen, und diversen werkstofftechnischen Eigenschaften, wie beispielsweise den Haupteigenschaften korrosionsbeständig, hitzebeständig, und (hoch-)warmfest. (Bartos & Stahlinstitut VDEh, 2015). Es lassen sich über 2.500 Stahlsorten unterscheiden, die das Stahlwerk in unterschiedlichsten Formgebung verlassen: vom Grobblech bis zum feinsten Draht (Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2024, 2024).

Stahlprodukte, die das Stahlwerk verlassen, können (und müssen) für den Zweck dieser Untersuchung jedoch stärker geclustert werden. Im Vordergrund stehen Unterschiede in den Qualitätsanforderungen mit Rückwirkung auf die akzeptablen Grenzen für im Stahl verbleibende Begleitelemente (siehe hierzu weiter unten die Ausführungen zu Schrottsorten). Für diesen Zweck werden Stahlprodukte üblicherweise nach „Langprodukten“ und „Flachprodukten“ unterschieden. Diese unterscheiden sich wesentlich bzgl. der Emissionsintensität ihrer Herstellung und ihren Anwendungszwecken.

Langprodukte können ganz wesentlich der Sekundärstahlroute (Schrotteinsatz im EAF) zugeordnet werden, und Flachprodukte der Primärstahlroute (Eisenerz, BF/BOF). Dabei handelt es sich um eine Vereinfachung, es gibt auch Stahlprodukte, für die diese nicht zutrifft. Nach Angaben des VDEh wurden im Jahr 2015 86 % der europäischen Brammen-Stranggießanlagen von BF/BOF-Stahlwerken versorgt, während 88 % der europäischen Knüppel-Stranggießanlagen durch EAF-Stahlwerke beschickt wurden. Für Blöcke als Vorprodukte von sehr großen Langprodukten ist das Bild weniger eindeutig, hier werden 59 % durch EAF-Stahlwerke versorgt (Herbst et al., 2025). Brammen sind das Vorprodukt von Walzwerken für die Produktion von Flachprodukten, während Knüppel im Walzwerk zu Langprodukten wie Draht, Bewehrungsstahl oder Profilen weiterverarbeitet werden.

Flachprodukte haben im Allgemeinen höhere Qualitätsanforderungen in dem beschriebenen Sinn als Langprodukte. In der Prozesskette von Langprodukten kann aufgrund dieser unterschiedlichen Qualitätsanforderungen heute in relevantem Ausmaß Altschrott eingesetzt werden (siehe die

folgenden Ausführungen zu Stahlschrott), in der Prozesskette von Flachprodukten nur sehr begrenzt.

Stahlschrott

Global werden aktuell (2022) ca. 630 Mio. t Stahlschrott in der Stahlindustrie wiederverwendet, das entspricht einem Anteil am Eisenträger-Input von 30%. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass 70% des Eisenträger-Inputs aus Primärmaterial, also aus Eisenerz, gedeckt werden. Verschiedene Net-Zero Szenarien sehen den Schrotanteil am Eisenträger-Input bis 2050 wachsen, auf 45-50 %. (Corneille & Agrawal, 2024)

Die Verfügbarkeit und Nutzung von Stahlschrott variieren stark zwischen den Staaten. In der Türkei wurden in 2022 86 % des erzeugten Stahls mit Stahlschrott produziert, in China waren es nur 22 %, die EU liegt mit 58 % im oberen Mittelfeld. Aufgrund des sehr hohen Anteils Chinas an der weltweiten Stahlproduktion übersetzen sich die genannten 22 % zu absoluten 225 Mio. t Schrotteinsatz, während die 86% Sekundärproduktion der Türkei nur einer absoluten Schrotteinsatzmenge von ca. 40 Mio. t entsprechen. (Corneille & Agrawal, 2024)

In Deutschland bewegte sich der Stahlschrotteinsatz in den vergangenen Jahren zwischen 19,2 Mio. t (2013) und 14,6 Mio. t (2023), mit abnehmender Tendenz, entsprechend der Abnahme der Stahlproduktion insgesamt. Im Jahr 2013 betrug die Einsatzquote 43 %, im Jahr 2023 waren es 41 %. (Hartung et al., 2025).

Angebot und Nachfrage nach Stahlschrott unterscheiden sich derzeit regional stark, der internationale Handel spielt daher eine große Rolle. Während die „klassischen“ Industriestaaten Überschussmengen exportieren (EU, USA, UK, Japan, Kanada mit gemeinsam 85% der globalen Schrottexporte), finden sich die relevantesten Importeuren unter den neuen Industriestaaten und Schwellenländern. Die Türkei war in 2022 mit knapp über 20 Mio. t Stahlschrott der größte Netto-Importeur, gefolgt von Indien, Korea, Ägypten, Taiwan, Pakistan und Mexiko. Die Türkei und Indien standen 2022 für 50% der globalen Schrottimporte. Interessanterweise ist der Netto-Schrottaußenhandel Chinas nahezu ausgeglichen. (Corneille & Agrawal, 2024). Aktuell bildet diese Handelsstruktur die historische Wirtschaftsentwicklung, die mit dem Aufbau größerer Stahl-Stocks in den klassischen Industriestaaten einherging, ab.

Die EU-Brutto-Exporte zeigen bis 2021 einen klar steigenden Trend, von 9,1 Mio. t in 2015 auf 19,4 Mio. t in 2021, die EU-Netto-Exporte wuchsen in diesem Zeitraum noch deutlicher von 3,9 Mio. t auf 13,3 Mio. t. Seit 2022 sinken die Brutto-Exporte und liegen in 2024 bei 16,3 Mio. t, die Netto-Exporte legten 2023 nochmals leicht zu auf 14,8 Mio.t, um in 2024 deutlich abzusinken auf 11,6 Mio. t. Die Entwicklung zeigt Abbildung 1.

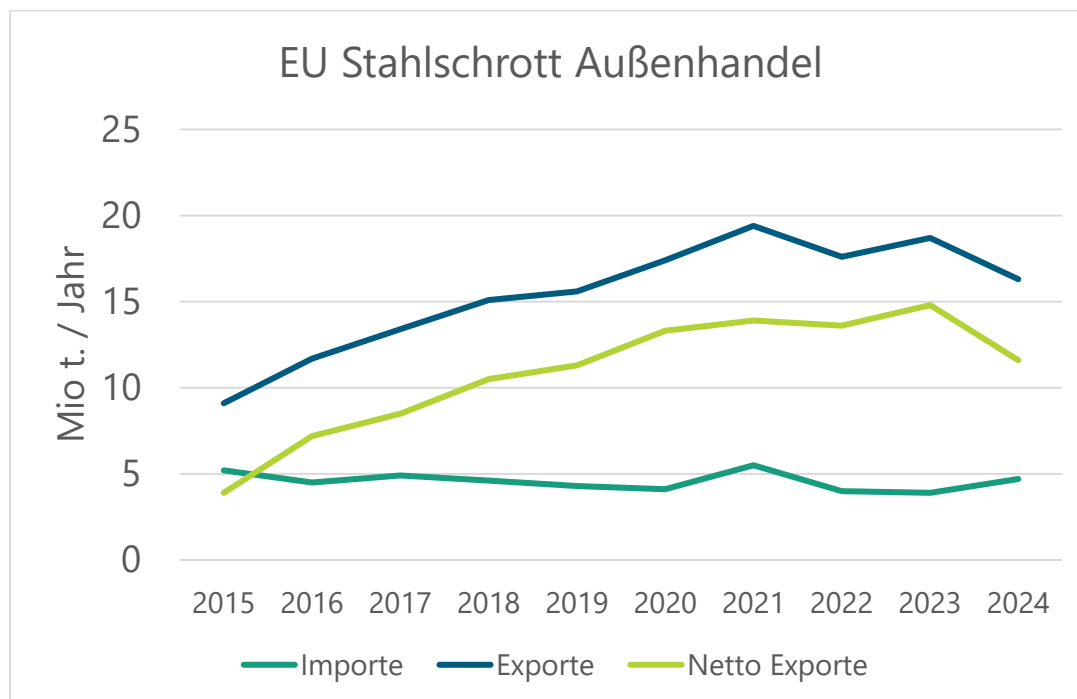


Abbildung 1: Entwicklung des EU Stahlschrott Außenhandels

Analog zu diesen Zahlen zeigt sich in der zweiten Hälfte der vergangenen Dekade zunächst ein abnehmender Trend der Stahlschrottnutzung innerhalb der EU, von 86,9 Mio. t in 2015 auf 75,3 Mio. t in 2020. Mit der wirtschaftlichen Erholung ab 2021 stieg auch die Stahlschrottnutzung wieder deutlich an, auf 87,9 Mio. t in 2021 und zuletzt 76,6 Mio. t in 2024. Insgesamt zeigen diese Zahlen für die EU eine hohe Konstanz, kurzfristige konjunkturelle Abhängigkeiten bei der Stahlschrottnutzung, sowie einen Stahlschrottexport auf hohem Niveau. (European Steel in Figures 2025, 2025). Zentraler Handelspartner für die Schrottexporte der EU ist die Türkei. In 2022 gingen 65 % der EU-Exporte in die Türkei, dies entsprach wiederum 57 % der Importe der Türkei. (Corneille & Agrawal, 2024).

Die OECD rechnet für die Zukunft mit stark steigenden Schrottmengen durch steigende Rückläufe aus Stahlprodukten, die ihr technisches Lebensende erreichen. Global wird gegenüber 2019 eine Verdopplung der zur Verfügung stehenden Schrottmenge von 600 auf über 1.200 Mio. t in 2050 erwartet, unter der Annahme, dass sich die Rückgewinnungsraten nicht ändern. Steigen diese, könnte die verfügbare Stahlschrottmenge bis 2050 sogar auf 1.350 Mio. t ansteigen. (Corneille & Agrawal, 2024). Legt man die oben genannte Erwartung einer bis 2050 auf 2.265 Mio. t steigenden Stahlproduktion zu Grunde, könnten bei einer typischen Einsatzquote von 1,1 t Stahlschrott pro Tonne Rohstahl, theoretisch bis zu 54 % der Stahlproduktion 2050 mit Stahlschrott als Eisenträger abgebildet werden, gegenüber ca. 30% heute. Diese Zahlen zeigen aber zugleich, dass eine globale Stahl-Kreislaufwirtschaft ohne den Einsatz von Primärmaterial in näherer Zukunft nicht erreichbar scheint.

Die globale Schrottverfügbarkeit wächst zukünftig vor allem abseits der klassischen Industriestaaten, da sich dort bei beschränkter Wachstumsperspektive die Zu- und Abflüsse aus den Stahl-Stocks ungefähr im Gleichgewicht befinden. In 2050 wird hier daher eine nur moderat höhere Schrottmenge gegenüber heute erwartet. Insbesondere in China wird sich die zur Verfügung stehenden Stahlschrottmenge bis 2050 gegenüber heute ca. verdreifachen, für den Rest

der Welt wird ungefähr eine Verdopplung erwartet. China allein wird, nach diesen Erwartungen, in 2050 über 45 % der gesamten Schrottmenge verfügen. (Corneille & Agrawal, 2024)

Analog zur steigenden Schrottmenge rechnet die OECD mit deutlich steigenden EAF-Anlagenkapazitäten, um diese Schrottmengen zu verarbeiten. Demnach steigt die EAF-Produktionsmenge von 510 Mio. t (2019) auf 1.340 Mio. t (2050), entsprechend einem Anstieg von 27% auf 50% der globalen Stahlproduktion. Der Schrotteinsatz im EAF steigt von 360 auf 820 Mio. t. Außerdem wird ein Anstieg des DRI-Bedarfs durch die EAF-Anlagenkapazität von 110 Mio. t (2019) auf 260 Mio. t (2050) erwartet. (Corneille & Agrawal, 2024). Diese Steigerung um 150 Mio. t in drei Jahrzehnten ist jedoch vor dem Hintergrund der weltweit bereits heute geplanten und absehbaren neuen DR-Anlagenkapazitäten zur DRI-Produktion als eher konservativ einzuschätzen. Allein bis 2030 (Jahr des geplanten Zubaus) führt der Global Steel Transformation Tracker von Agora Industry (Agora Industry, 2023) derzeit geplante DR-Anlagenkapazitäten mit einem Umfang von 98,3 Mio. t DRI auf.

Trotz der global wachsenden Schrottverfügbarkeiten, und trotz der in den klassischen Industriestaaten nur moderat steigenden Schrottmengen, erwartet die OECD für die Zukunft weiterhin und sogar steigende regionale Disbalancen zwischen Schrottverfügbarkeit und -bedarf. Für die klassischen Industriestaaten wird in Summe ein gegenüber 2019 nochmals wachsender Schrottüberschuss um ca. 20 Mio. t auf dann 60 Mio. t erwartet. Das Wachstum der Schrottrückflüsse in China in den nächsten Dekaden wird als so stark erwartet, dass China von einer aktuell leichten Unterdeckung des eigenen Bedarfs in 2050 Schrottüberschüsse von ca. 80 Mio. t aufweisen wird. Dies wird auch durch den erwarteten Rückgang der chinesischen Stahlproduktion begründet. Für die restliche Welt hingegen wird eine deutliche Unterdeckung des Bedarfs von ca. 70 Mio. t in 2050 erwartet. (Corneille & Agrawal, 2024)

Für die EU erwarten Dworak et al. (Dworak et al., 2022) deutlich steigende Altschrottmengen (zu den Schrottsorten siehe unten), von 80 Mio. t in 2020 (entsprechend 65 % der insgesamt in der EU verfügbaren Schrottmenge) auf 100 Mio. t in 2050 (75% der gesamten Schrottmenge). Der Überschuss an qualitativ geringwertigem Altschrott in der EU wird demnach von heute 20 Mio. t auf 43 Mio. t in 2050 wachsen.

Aus diesem Ausblick auf 2050 ergibt sich die Erwartung einer zukünftig noch stärkeren Rolle des Welthandels zum Ausgleich dieser Disbalancen, oder alternativ, im Rahmen industriepolitischer Erwägungen, für Staaten mit Schrottüberschüssen eine gezielte Anpassung der Stahlproduktion hin zu einer verstärkten Nutzung eigener Überschüsse. Für die EU zeigen die genannten Zahlen, dass sich insbesondere die Frage nach dem Umgang mit den stark steigenden, inländisch ohne strukturelle Anpassungen nicht genutzten Altschrottmengen geringer Qualität stellt.

Schrottsorten und Preise

Schrottqualitäten und -sorten werden nach diversen Schemata klassifiziert. Es können nach Herkunft drei Grundtypen unterschieden werden:

- *Eigenschrott*: aus der Stahlindustrie selbst, wird nicht gehandelt, sondern vor Ort direkt wieder zur Stahlherstellung eingesetzt
- *Neuschrott, pre-consumer-scrap*: Rücklauf aus der Industrie, wird zwischen den Stahlabnehmer als Lieferant und dem Stahlwerk als Kunden gehandelt, die Werkstoffeigenschaften sind in aller Regel gut bekannt, sodass ein direkter Wiedereinsatz im Stahlwerk möglich ist
- *Altschrott, post-consumer-scrap, end-of-life (eol) scrap*: sehr diverse Schrotte mit oftmals unbekannter chemischer/metallurgischer Zusammensetzung

Altschrott steht im Fokus dieser Untersuchung. Altschrott kommt insbesondere in der oben beschriebenen Sekundärstahlroute zum Einsatz; überwiegend werden mit Altschrott Stahlqualitäten erzeugt, bei denen eine exakt definierte Zusammensetzung des Werkstoffs weniger entscheidend ist bzw. bei denen größere Bandbreiten der chemischen Zusammensetzung akzeptabel sind, wie z.B. bei Baustählen.

Tabelle 1: Angestrebte Grenzwerte für Fremdmittelgehalte in EFR-Schrottspezifikationen. Entnommen aus ((EU-27 Steel Scrap Specification, 2007)).

Category	Specification	Aimed Analytical Contents (residuals) in %				
		Cu	Sn	Cr, Ni, Mo	S	P
OLD SCRAP	E3	≤0.250	≤0.010	Σ≤0.250		
	E1	≤0.400	≤0.020	Σ≤0.300		
NEW SCRAP Low Residuals, Uncoated (2)	E2	Σ≤0.300				
	E8	Σ≤0.300				
	E6	Σ≤0.300				
SHREDDED	E40	Σ≤0.250	Σ≤0.020			
STEEL TURNINGS (3)	E5H	Prior chemical analysis could be required				
	E5M	≤0.400	≤0.030	Σ≤1	≤0.100	
HIGH RESIDUAL SCRAP	EHRB	≤0.450	≤0.030	Σ≤0.350		
	EHRM	≤0.400	≤0.030	Σ≤1.0		
FRAGMEN- TIZED SCRAP FROM INCINERATION	E46	≤0.500	≤0.070			

Die European Ferrous Recovery and Recycling Branch (EFR) ist die Vertretung der Eisen- und Stahlrecycler innerhalb des Dachverbands Recycling Europe und hat mit der „EU-27 steel scrap specification“ (EU-27 Steel Scrap Specification, 2007) eine Kategorisierung von Schrottsorten für den Handel herausgegeben.

Die Spezifikation der Schrottsorten geschieht entlang der Eigenschaften

- Abmessungen
- Dichte, und
- Gehalt an Fremdstoffen.

Hier steht die Differenzierung nach Anforderungen an den Fremdstoffgehalt im Vordergrund. Die spezifizierten Stahlsorten sollen die in Tabelle 1 gezeigten „angestrebten“ Grenzwerte an metallischen Fremdelementen (siehe weitere Diskussion in Abschnitt 4) nicht überschreiten. In der

Praxis wird eine Prüfung, ob die Grenzwerte tatsächlich eingehalten werden, aktuell allerdings nur stichprobenartig durchgeführt (Dworak et al., 2022).

Altschrott umfasst hier die Spezifikationen E1 und E3, während Neuschrotte mit in Summe deutlich niedrigeren Grenzwerten die Spezifikationen E2, E8 und E6 umfasst. Die Spezifikation E40 umfasst Schredderschrott, d.h. Schrott, der bereits mit einem Schredderverfahren aufbereitet wurde. Die Grenzwerte für E40 sind mit denen für Neuschrott vergleichbar. Die beiden „High Residual Scrap“ Spezifikationen EHRB und EHRM umfassen Schrotte insbesondere aus Infrastrukturanwendungen wie beispielsweise Bewehrungsstähle, die selbst ursprünglich aus qualitativ geringwertigeren Schrotten produziert wurden. E46 erfasst Restschrott aus der Müllverbrennung, die Spezifikationen der Kategorie „Steel Turnings“ umfasst Stahlschrottspäne aus der Zerspanung von Stahlwerkstücken, differenziert nach Reinheitsanforderungen.

Für einen Abgleich zwischen typischen Produkt- bzw. Stahlgütenanforderungen und den vorgenannten Spezifikation, siehe Kapitel 6.

Die Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen (BDSV) veröffentlicht monatliche Lagerverkaufspreise ihrer Mitglieder nach Stahlschrottsorten (BDSV - Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V., o. J.). Abbildung 2 zeigt die jährlichen Durchschnittspreise⁹ von 2014 bis 2025 für die beiden Altschrott-Sorten E1 und E3. Dabei zeigt sich insgesamt ein steigender Trend der Stahlschrottpreise, mit einem deutlichen Preissprung 2020 bis 2022 sowie seit 2023 wieder sinkenden Preisen. Der Mittelwert über den gesamten Zeitraum für E1 beträgt 246 € / Tonne, für E3 274€/Tonne. Die Preise beider Schrottsorten sind offensichtlich korreliert, E3 ist in allen Jahren etwas teurer als E1, was darauf hinweist, dass E3 von Markt als der qualitativ hochwertigere Schrott bewertet wird. Der Preissprung 2020 bis 2022 ist vermutlich auf die Lieferschwierigkeiten / Verwerfungen im Zuge der Covid-Pandemie zurückzuführen. Es bleibt abzuwarten, ob der aktuelle Trend zu sinkenden Schrottpreisen weiter anhält und mittelfristig wieder die vor dem Preisschock zu erkennende Preisspanne von 150 bis 250€ erreicht wird.

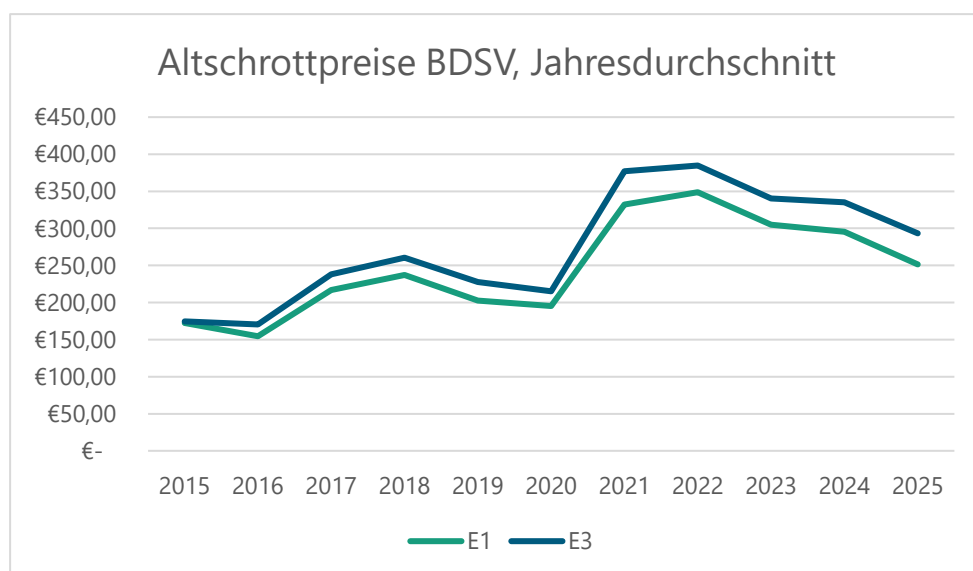


Abbildung 2: Altschrott-Lagerverkaufspreise in Deutschland, Sorten E1 und E3, 2015 - 2025

⁹ Ungewichteter Mittelwert der jeweiligen Monatswerte. Für 2025: Januar – Oktober. Nominale Preise der jeweiligen Jahre.

3 Zielsetzung

Diese Untersuchung verfolgt verschiedene Zielsetzungen im Kontext der Substituierbarkeit der erzbasierten Stahlherstellung für Qualitätsgütern durch eine gesteigerte Nutzung von Altschrott. Zunächst wird dargelegt, wodurch die Substituierbarkeit bzw. der Einsatz von Altschrott in EAF zur Produktion qualitativ hochwertiger Stahlgütern aktuell hemmen. Hier geht es vor allem um Begleitelemente bzw. Fremdmetalle im Schrott.

Anschließend werden technische Optionen zur Adressierung dieser Problematik untersucht, d.h. ihre Marktgängigkeit bzw. ihr Status und ihre Relevanz in Forschung und Entwicklung.

Mit einer techno-ökonomischen Analyse werden die spezifischen Produktionskosten verschiedener Stahlproduktionsrouten miteinander verglichen, um die wirtschaftliche Attraktivität einer gesteigerten Altschrottnutzung abschätzen zu können. Technischer Ausgangspunkt ist hierbei die Flexibilität des EAF bzgl. des Eisenträgereinsatzes. Als Vergleichsprozess wird die zukünftig als dominierend eingeschätzte DR/EAF-Route mit 100% HBI-Einsatz und 100% H₂-Einsatz herangezogen. Sensitivitäten werden für verschiedene Preisszenarien (CO₂, Strom, H₂, Schrott, etc.) betrachtet.

Ergänzend zur Angebotsseite wird auch die Nachfrage nach Stahl betrachtet, mit Blick auf Produkthanforderungen an bestimmte Stahlgütern, die zu einer geringen Altschrottnutzung beitragen. Ziel ist es, herauszuarbeiten, ob bestimmte Produkthanforderungen ggf. relaxiert werden könnten.

Die Analyse wird weiterhin ergänzt durch eine Einordnung der Thematik in der energie- und klimapolitischen Kontext. Es werden sowohl bestehende Regulierung als auch aktuell diskutierte Regulierungsansätze dargestellt und eingeordnet. Abschließend erfolgt eine Ableitung von Handlungsansätzen sowie weiteren Forschungsfragen.

4 Technische Herausforderungen und Lösungen für die intensivierte Altschrottnutzung in der Stahlherstellung

4.1 Begleitelemente als zentrale Herausforderung für die Altschrottnutzung

Begleitelemente im Stahl, die nicht als Legierungselemente hinzugegeben werden um die Werkstoffeigenschaften gezielt zu beeinflussen, sind das zentrale Problem für den Einsatz von Altschrott als Eisenträger für hochqualitative Stahlsorten.

Die durch den Stahlschrott eingetragenen Begleitelemente Kupfer (Cu), Molybdän (Mo), Chrom (Cr), sowie Nickel (Ni) und Zinn (Sn) sind die für diese Problematik relevantesten Begleitelemente (Arun et al., 2024). Die genannten relevanten Begleitelemente beeinflussen je nach Stahlgüte sowohl metallurgische Prozesse als auch werkstoffliche Produkteigenschaften. Kupfer beispielsweise hat einen negativen Einfluss auf die Duktilität, die Schweißbeignung und die Bruchzähigkeit des Stahls. Mit dem derzeit marktüblichen Schrotthandling (siehe 4.2) kann Altschrott nicht so aufbereitet werden, dass er hinsichtlich der erforderlichen Maximalgehalte an Begleitelementen als Eisenträger für qualitativ hochwertigere Stahlgüten zum Einsatz kommen kann. Darüber hinaus fehlt bei dem derzeitigen Handling auch – von Stichproben abgesehen – eine Charakterisierung des Schrotts (Input und Output). Nach Aussagen der in (Dworak et al., 2023) befragten Stahlunternehmen werden diese Elemente über den eingesetzten Stahlschrott größtenteils über den für die Stahlgüten geforderten Grenzwerten eingetragen. (Dworak et al., 2023)

Im Folgenden werden zentrale Herausforderungen mit den wichtigsten Begleitelementen sowie gängige technische Optionen zur Entfernung kurz dargestellt. Auf innovative, noch wenig oder nicht etablierte Techniken wird in 4.3 näher eingegangen.

Kupfer hat unter den genannten Begleitelementen nochmals besondere Relevanz. Bis auf wenige Ausnahmen kommt es – im Unterschied zu Molybdän, Chrom und Nickel – nicht als Legierungselement zur Anwendung. Automobilschredder enthält hohe Mengen an Kupfer von ca. 0,2-0,25 wt.-%, mit steigender Tendenz durch den Trend zur Elektromobilität und die hierdurch steigende Menge von verbautem Kupfer im Automobil. Der Kupferanteil in geschredderten end-of-life Fahrzeugen kann bis zu 0,7 wt.-% betragen (Transport & Environment (T&E), 2025). Die beste Möglichkeit zur Entfernung von Kupfer ist eine sorgfältige Schrottsortierung. Da Kupfer edler ist als Eisen, ist es durch Oxidation nicht aus der Stahlschmelze zu entfernen. Durch den geringen Dampfdruck ist es auch mit einer Vakuumbehandlung (Entgasung, typisches Verfahren der Sekundärmetallurgie) der Stahlschmelze nur schlecht entfernbar. Das Vakuumumschmelzverfahren (VAR) wiederum ist grundsätzlich geeignet, um Kupfer aus dem Stahl zu entfernen. Dieses Verfahren ist jedoch aufwendig – bereits zu Blöcken vergossener Stahl wird mit einem Lichtbogen im Vakuum nochmals aufgeschmolzen und durch ein Schlackebad getropft (Höfler, o. J.) – und derzeit nur für besonders hochwertige Edelstahlqualitäten wirtschaftlich anwendbar. (Dworak et al., 2023)

Molybdän wird als Legierungselement für Einsatzstähle verwendet, darüber hinaus ist es im Stahl als Begleitelement unerwünscht. Wie Kupfer ist es edler als Eisen und lässt sich nicht oxidativ oder durch Verdampfung im Vakuumverfahren aus der Stahlschmelze entfernen. Im Gegensatz zu anderen Begleitelementen (siehe Kapitel 4.3.2) sind für Molybdän auch keine theoretischen Verfahren zur Entfernung bekannt, sodass nur das Verdünnen mit anderen Eisenträgern bleibt, um erforderliche Grenzwerte einzuhalten. (Dworak et al., 2023)

Zinn kann aufgrund seines hohen Siedepunkts durch Vakuumbehandlung nicht aus der Schmelze entfernt werden. Im EAF kann es jedoch teilweise im Brennfleck entfernt und als Staub im Abgas abgezogen werden (Dworak et al., 2023). Eine wichtige Quelle für Zinn sind post-consumer Verpackungen (Rod et al., 2006).

Nickel ist ebenfalls zu edel, um aus dem Stahlbad entfernt zu werden. Zentral ist die sorgfältige Trennung nickelhaltiger Schrotte von anderen Stahlschrotten (Dworak et al., 2023). Nickel wird als Legierungselement für verschiedensten Stahlsorten als auch für Beschichtungen eingesetzt (Rod et al., 2006).

4.2 Status Quo der Schrottaufbereitung

Altschrott wird von Recyclingunternehmen aufbereitet, um aus dem gesammelten Mischschrott handelbare Schrottfractionen bzw. -sorten zu gewinnen. Dabei steht zum einen die Zerkleinerung, zum anderen die Entfernung von nicht metallischen Fremdstoffen sowie NE-Metallen im Vordergrund.

Neben der im Recycling insgesamt weitverbreiteten händischen Sortierung (Maier et al., 2024) sind das Schreddern und das Scheren typische Aufbereitungsverfahren. Zentrales Element eines Schredders ist eine rotierende Trommel mit Hämmern, durch welche der Schrott zerkleinert wird. Die Zerkleinerung dient nicht nur einem besseren Handling, z.B. einem erhöhten Masse/Volumen-Verhältnis für den Transport bzw. Handel, sondern insbesondere auch der Trennung bzw. Freisetzung unterschiedlicher Materialien (sogenannte Liberation); tendenziell kann durch feinere Zerkleinerung eine höhere Liberation erreicht werden. Je höher die Liberation, desto schärfer können unterschiedliche Materialien aus einem Gemenge getrennt werden. Auf die Zerkleinerung folgt die mechanische Separation mittels verschiedener physikalischer Wirkprinzipien und Techniken. Magnetabscheider trennen eisenhaltiges Material ab (außer hochlegierte Stähle / Edelstähle), mit Wirbelstromabscheidern können NE-Metalle aussortiert werden. Weiterhin kommen Fliehkraftabscheider (Zyklone) und Schwerkraftseparation sowie Siebe zum Einsatz. Scheren sorgen für das Einhalten der spezifizierten Abmessungen der Schrottsorten, z.B. der Altschrottsorten E1 und E3. (Russo & Pierret, 2024; Schäfer, 2021)

4.3 Technische Lösungen zur Optimierung der Schrottaufbereitung

Entlang der Wertschöpfungskette des Altschrotts gibt es drei grundsätzliche Interventionspunkte für die Optimierung der Altschrottnutzung: die Schrottsammlung, die Aufbereitung durch Recycler, und die Nutzung im Stahlwerk. Bei der Schrottsammlung steht die Abfallwirtschaft und eine bessere Getrennterfassung der anfallenden Schrotte im Vordergrund; hierbei handelt es sich um wesentlichen um organisatorische und regulatorische Interventionen. Bei den Schrottrecyclern geht es um die Aufbereitung der Schrotte für den Handel, insbesondere durch technische Lösungen zur besseren Sortierung der Schrotte, und bei den Stahlwerken um verschiedenste metallurgische Verfahren zur Entfernung von Begleitelementen aus den gelieferten Schrotten. Beim Recycling und der weiteren Aufbereitung durch die Schrottnutzer stehen also technische Lösungen im Vordergrund. Auf diese fokussiert sich die vorliegende Untersuchung.

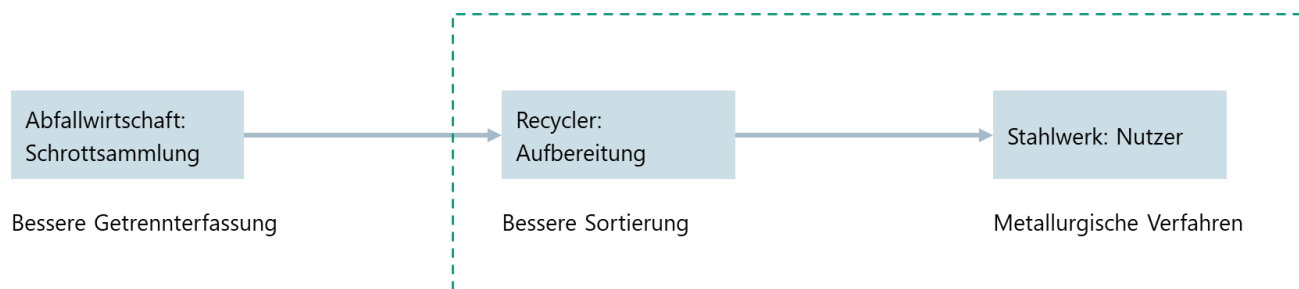


Abbildung 3: Interventionspunkte für eine Steigerung des Altschrotteinsatzes

4.3.1 Sensorgestützte Sortiertechniken

Einführung

Ein zentraler Ansatzpunkt sind sensorgestützte Sortiertechniken. Diese werden für verschiedenste Sortieraufgaben und auch für das Metallrecycling, insbesondere die Sortierung von Aluminiumschrotten (siehe unten), teilweise schon sehr lange eingesetzt, für die Aufbereitung von Stahlschrott sind sie allerdings noch kaum verbreitet und Gegenstand von F&E-Aktivitäten, die im Folgenden weiter untersucht werden.

Die Bezeichnung „sensorgestütztes Sortierverfahren“ bezieht sich auf verschiedene Verfahren, welche die gezielte Separation von Partikeln aus einem Stoffstrom auf der Basis von Sensordaten ermöglichen (Maier et al., 2024). Sensorgestützte Sortierverfahren setzen sich daher aus verschiedenen Prozessschritten bzw. Einzeltechniken zusammen: der Materialzufuhr, der sensorischen Materialanalyse/Erfassung, der Datenverarbeitung, sowie der physikalischen Materialtrennung (Fraunhofer IOSB, o. J.). Die Sensor-Einheit (oder mehrere Einheiten bei Multi-Sensor-Systemen) ergänzen die „klassische“ Schrottaufbereitung, siehe Abbildung 4.

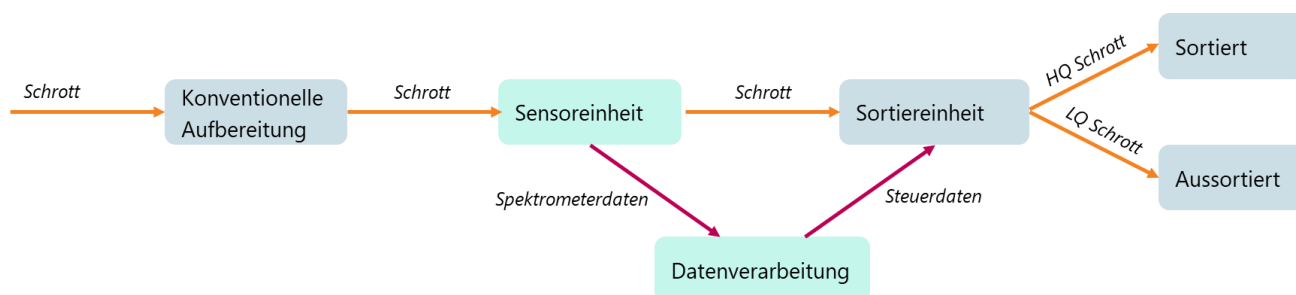


Abbildung 4: Prozessschema Stahlschrottaufbereitung inklusive sensorgestützter Sortierung

Für die genannten Prozessschritte lassen sich – nicht nur für die Aufbereitung von Stahlschrott, sondern für die Sortierung beliebiger Stoffströme –, grundlegende Anforderungen definieren, die es durch Technikentwicklung und systemische Optimierung des Gesamtverfahrens zu optimieren gilt, um möglichst effiziente Sortierergebnisse zu erzielen; siehe Tabelle 2, auf Basis von (Maier et al., 2024).

Tabelle 2: Grundlegende Verfahrensanforderungen für sensorgestützte Sortiersysteme

Prozessschritt	Anforderungen
Zufuhr und Transport	Großer Partikelabstand, Vermeidung Clusterbildung, einheitliche Partikelgeschwindigkeit; Erzielung gewünschter Massendurchsatz;
Sensortechnik	Einsatz der Sensortechnologie(n) abhängig von zu detektierenden Eigenschaften; Detektion individueller Partikel
Datenverarbeitung	Bild-/Signalverarbeitung zur Klassifizierung individueller Partikel, zeitlich und räumlich aufgelöste Steuersignale für Ansteuerung der Aktuatoren, Minimierung Zeitverzögerung der Ansteuerung
Materialtrennung	Array von Aktuatoren, in der Regel senkrecht zum Transportband, um individuelle Partikel ansteuern zu können; Aktuatoren müssen Pfadänderung der anzusteuernden Partikel verursachen (z.B. pneumatisch) um Getrennsammlung zu ermöglichen

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die für sensorgestützte Sortierverfahren einsetzbaren, identifizierten Sensortechniken. Die zu detektierenden Eigenschaften des Materials bestimmen die einzusetzende Sensortechnik, bzw. die Kombination verschiedener Sensortechniken (Maier et al., 2024). Sensorgestützte Sortierungssysteme sollten mit Stoffströmen beschickt werden, deren Partikelgrößen sich in einer klar definierten, nicht zu breiten Bandbreite bewegen, da die Auswahl der System- und Prozessparameter von der Partikelgröße abhängt; als „Daumenregel“ hat sich nach (Maier et al., 2024) ein Größenverhältnis von 1:3 zwischen dem kleinsten und dem größten Teil bewährt. Aus diesem Grund werden sensorgestützte Sortierungssysteme in den bekannten (siehe unten) Anwendungsfällen nachgelagert zu den gängigen Verfahren zur Zerkleinerung und Sortierung des Stahlschrotts angewandt.

Aus der Literatur lässt sich klar erkennen, dass insbesondere LIBS und XRF/XRT vielversprechend sind für die Aufgabe, Altschrott auf seine chemische Zusammensetzung und damit auch auf die Verunreinigung mit Begleitelementen hin zu analysieren. Die weiteren in Tabelle 3 genannten Sensortechniken bieten sich als komplementäre Sensoren für Multi-Sensorsysteme an.

Tabelle 3: Identifizierte Sensortechniken für die sensorgestützte Sortierung

Kurzbezeichnung	Langbezeichnung	Vorteile	Nachteile
LIBS / LIPS	Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (Laser Induced Breakdown Spectroscopy)	elementare Zusammensetzung Schrott ermittelbar, keine-wenig Vorbehandlung erforderlich	Geringer Durchsatz für Einzelsysteme, Punktmessung / Oberflächenmessung, komplexe Kalibrierung
LIFS	Laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie	Materialcharakterisierung im Sinne eines „Fingerabdrucks“	Geringer Durchsatz, keine Bestimmung der elementaren Zusammensetzung
LiDAR	Laser imaging, detection, and ranging	Präzise 3D-Formerkennung	Keine Elementcharakterisierung
XRF / RFA	Röntgenfluoreszenz	Charakterisierung des Schrotts im Sinne eines Fingerabdrucks (hoch-/niedrig-legiert z.B.)	Oberflächenmessung, Sicherheitsaspekte (Strahlenschutz); keine genaue Elementanalyse
XRT	Röntgentransmission	Charakterisierung des Schrotts im Sinne eines Fingerabdrucks (hoch-/niedrig-legiert z.B.); Partikeldicke nicht entscheidend	Sicherheitsaspekte (Strahlenschutz); keine genaue Elementanalyse
(N)IR	(Nah-)Infrarotspektroskopie	Hohe Analysegeschwindigkeit, sehr gut zur Detektion von Verunreinigungen und nicht-metallischen Begleitstoffen	Keine eindeutige chemische Identifizierung von Metallen möglich
VIS / RGB	Spektroskopie im sichtbaren Spektrum	Hohe Auflösung, als Ergänzung in Kombination mit anderen Sensoren	Hohe Falsch-Negativ-Rate durch optisches Verfahren (z.B. korrodierter Stahl wird als Kupfer erkannt)
PGNAA	Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (Neutronenspektroskopie)	Eindringtiefe ermöglicht Volumenanalyse, hohe Sensitivität für metallische Begleitelemente	Sicherheitsaspekte (Strahlenschutz), Komplexes Spektrum → viel Noise im Spektrum, begrenzte räumliche Auflösung

Bei **LIBS** handelt es sich um eine Punktmessung durch die Erzeugung eines Plasmas aus der Oberfläche eines Stahlschrottpartikels. Dies hat zwar den Vorteil einer sehr genauen und spezifischen spektroskopischen Analyse der elementaren Zusammensetzung des untersuchten Objekts; grundsätzlich können sämtliche Elemente des Periodensystems anhand der charakteristischen Emissionslinien identifiziert werden (chemometrische Auswertung) (Pillkahn et al., 2015). Allerdings, dies bestätigt auch ein Vertreter des LIBS-Systemherstellers cleansort GmbH, kann mit LIBS als Punktmessverfahren immer nur die elementare Zusammensetzung des untersuchten Messpunktes genau bestimmt werden. Bei inhomogenem Material ist dies klar nachteilig. Je homogener das Aufgabegut ist (beispielsweise durch gesteigerte Libration / Trennung von Verbundmaterial durch intensivierte Schreddern) desto repräsentativer das Ergebnis der LIBS-Spektraluntersuchung bezogen auf das Sortiergut. Nach Angaben des befragten Vertreters der cleansort GmbH können die LIBS-Systeme dieses Unternehmens bis zu einer Sensitivitätsgrenze von ca. 0,05 bis 0,1 wt.-% Legierungs- und Begleitelemente in der Metallmatrix detektieren. Insbesondere Kupfer ist demnach in der Eisenmatrix gut detektierbar und die Sensitivitätsgrenze liegt eher bei 0,05 wt.-%. Den von cleansort angebotenen LIBS-Systemen können, nach Aussage des

Unternehmens, Sortiergrenzen für bestimmte oder kumulativ alle Legierungs-/und Begleitelemente im Rahmen der Sensitivitätsgrenzen beliebig vorgeben werden. Eine Sortierung nach wt.-% für die Legierungs- oder Begleitelemente in der Metallmatrix ist nach Angaben der cleansort GmbH nur mit LIBS-Systemen, nicht aber mit XRF und XRT möglich. Diese Verfahren ermöglichen nur eine qualitative bzw. semi-quantitative Einschätzung der Zusammensetzung des Sortierguts.

Bei der **Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF)** handelt es sich ebenfalls um eine Oberflächenmessung. Diese ist grundsätzlich geeignet, hoch-legierte oder mit relevanten Anteilen von Begleitelementen verunreinigte Schrottpartikel von niedrig-legierten oder mit nur geringen Anteilen von Begleitelementen verunreinigten Schrottpartikeln zu unterscheiden. Eine genaue Elementanalyse wie mit LIBS ist jedoch nicht möglich. Bei beschichteten Stählen, beispielsweise verzinktem Stahl, wird das Material jedoch nicht als Stahl, sondern beispielsweise als Zink, identifiziert und folglich für eine nachfolgende Materialtrennung falsch zugeordnet (CAESAR-Konsortium, o. J.). Bei LIBS kann diese Problematik durch Laserablation der Beschichtungen gelöst werden (Pillkahn et al., 2015).

Bei der **Röntgentransmissionsspektroskopie (XRT)** handelt es sich um eine Volumenmessung, bei der die Absorption von Röntgenstrahlung von Materialeigenschaften auf elementarer Ebene (Ordnungszahl und Dichte des durchstrahlten Materials) abhängt und der transmittierte Anteil der Strahlung ausgewertet wird (Mesina et al., 2007; Xiong et al., 2021). Die XRT-Messung ist grundsätzlich geeignet, Schrottpartikel mit hoher effektiver Ordnungszahl — etwa kupfer- oder bleihaltige Legierungen — von solchen mit niedriger effektiver Ordnungszahl — etwa Aluminium oder unlegierten Stählen — zu unterscheiden (Mesina et al., 2007). Eine elementspezifische Analyse wie mit LIBS ist jedoch nicht möglich; XRT liefert primär einen Kontrast hinsichtlich der mittleren Ordnungszahl und Dichte des durchstrahlten Volumens (Mesina et al., 2007). Da die Messung das gesamte Materialvolumen erfasst, wirken Oberflächenbeschichtungen — wie etwa Verzinkungen — in der Regel weniger störend als bei den oben beschriebenen Oberflächenverfahren, weil ihr Beitrag zum Gesamtsignal geringer ist (Xiong et al., 2021).

Eine Kombination von LIBS-Systemen mit einer Vorsortierung durch XRF/XRT-Anlagen ist ein vielversprechender Ansatz, um das Sortierergebnis insgesamt zu verbessern; durch die XRT/XRF-unterstützte Vorsortierung kann die Qualität bzw. Homogenität des Aufgabegutes für die genaue Elementcharakterisierung durch LIBS verbessert werden, beispielsweise indem mit Hilfe der XRF/XRT-Anlagen Materialverbände, z.B. Stahlschrott mit Kupferdraht oder Kupferankern, identifiziert und entfernt werden, bevor der Schrott in das LIBS-Sortiersystem aufgegeben wird. In diesem Zusammenhang ist auch eine möglichst hohe Liberation z.B. durch intensivierte Schreddern hilfreich. Somit wird die Ableitung der elementaren Zusammensetzung des gesamten Sortiergutes durch das LIBS-Punktmessverfahren zuverlässiger. Diese Einschätzung wurde im Gespräch auch durch den befragten Vertreter der cleansort GmbH bestätigt.

Forschungs- und Entwicklungsvorhaben sowie -themen

Um deutsche und europäische Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu identifizieren, wurde bei EnArgus (Projekträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH, o. J.) und weiteren bei EnArgus nicht abgedeckten Programmen zur Forschungsförderung sowie, für EU-geförderte Vorhaben, in der EU-Datenbank CORDIS (Europäische Kommission, o. J.-a) recherchiert.

EnArgus umfasst die Vorhaben des Energieforschungsprogramms des Bundes. Dort konnte nur ein möglicherweise relevantes Vorhaben identifiziert werden, zu dem jedoch zum Zeitpunkt der Studiererstellung, ein halbes Jahr nach Projektstart, keine Informationen vorliegen.

Vier relevante Vorhaben wurden durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert. Diese sind auch unter dem Gesichtspunkt einer effektiven Forschungs- und Entwicklungsförderung von hohem Interesse, da hier eine Technologie von der Optimierung der Einzeltechnik über die Systementwicklung bis hin zur Marktreife mit aufeinander aufbauenden Vorhaben unterstützt wurde. Tabelle 4 stellt die fünf identifizierten, als relevant eingestuft und durch nationale Fördermittel in Deutschland geförderten Projekte zusammenfassend dar.¹⁰

Tabelle 4: Nationale FuE Vorhaben zur sensorgestützten Stahlschrottsortierung¹¹

Projekt	Budget [Mio. €]	Start	Ende	Programm	Stahlhersteller involviert?	Technologie	Sensortechnik
CO ₂ -Reduktion durch Schrottaufbereitung	10	2025	2029	EEW	Feralpi Riesa	?	?
COLA I	0,12	2014	2015	DBU	-	Sensorgestützte Sortierung	LIBS
COLA II	0,27	2015	2017	DBU	-	Sensorgestützte Sortierung	LIBS
HILDE	0,27	2018	2020	DBU	-	Sensorgestützte Sortierung	LIBS
ready2sort	0,54	2021	2023	DBU	-	Sensorgestützte Sortierung	LIBS

Quellen DBU geförderte Projekte siehe Abschlussberichte DBU-Projektdatenbank: <https://www.dbu.de/projekte/projektsuche/>

Auf europäischer Ebene konnten mit einer Suche in der CORDIS Datenbank insgesamt sieben FuE-Vorhaben identifiziert werden, die sich der besseren Aufbereitung und Nutzung von Stahlschrott widmen. Nicht alle dieser zumeist hochvolumigen Vorhaben befassen sich technologisch (ausschließlich) mit der sensorgestützten Sortierung, sondern ganz oder teilweise auch mit metallurgischen Verfahren zur Entfernung von Begleitelementen aus der Stahlschmelze oder zur Steigerung der Toleranz von Stählen gegenüber Begleitelementen. Tabelle 5 gibt einen Überblick; alle aufgeführten Vorhaben wurden durch die HORIZON-Programme der EU gefördert. Die Tabelle zeigt, dass es sich um hochvolumige, langlaufende und aktuelle Vorhaben handelt. Von Interesse ist auch, dass eine Reihe europäischer Stahlhersteller, insbesondere auch Primärstahlhersteller, als Projektpartner beteiligt sind. Für die ab 2024 und noch lange laufenden Vorhaben sind nur wenige bis keine Informationen zu Projektergebnissen und den untersuchten Verfahren verfügbar; teilweise wird dies auch auf Geheimhaltungsinteressen zurückzuführen sein. Insgesamt lässt sich hieraus aber schließen, dass die Thematik der besseren Altschrottaufbereitung bzw. -nutzbarmachung aktuell auf hohes Interesse sowohl bei Forschenden als auch bei der Stahlindustrie trifft.

¹⁰ Zwei weitere Vorhaben konnten beim Umweltinnovationsprogramm (UIP) des Bundesumweltministeriums identifiziert werden, diese werden jedoch für die Thematik dieser Untersuchung als nicht hinreichend relevant eingestuft, da hier die Abtrennung von Metallen an sich, und insbesondere von NE-Metallen, aus der Schredderleichtfraktion und nicht die Sortierung von Stahlschrotten Vorhabensziel war bzw. ist.

¹¹ DBU = Deutsche Bundesstiftung Umwelt; EEW = Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft; Langtitel der Vorhaben: siehe Quelle.

Tabelle 5: EU geförderte FuE-Vorhaben zur optimierten Schrottaufbereitung

Projekt	Budget [Mio. €]	Start	Ende	Stahlhersteller involviert?	Technologie	Sensortechniken
REVaMP	7,9	2020	2023	ArcelorMittal, Sidenor	Sensorgestützte Sortierung, IKT für optimierte EAF- Chargierung	PGNAA, LIBS
CAESAR	5,6	2022	2026	ArcelorMittal	Sensorgestützte Sortierung	XRF, XRT, LIBS, RGB/VIS, KI
HYIYIELD	3,6	2022	2025	Saarstahl/SHS, voestalpine, Ferriere Nord	Sensorgestützte Sortierung	Laser Scanner, OES, KI
PURESCRAP	5	2023	2026	SSAB, voestalpine	Sensorgestützte Sortierung	LIBS, XRF, RGB, LiDAR
MEDALS	5,7	2024	2028	Sidenor	Sensorgestützte Sortierung, Entfernung von Begleitelementen aus Schmelze	n.a.
CISMA	4,4	2024	2028	Tata Steel Nederland, voestalpine	Wirkungsanalyse von Begleitelementen, Charakterisierung von Schrott	Keine oder n.a.
NANO-S- MART	3,1	2024	2028	-	Wirkungsanalyse von Begleitelementen	Keine

Quellen Projektinformationen: CORDIS-Datenbank (Europäische Kommission, o. J.-a)

Die in Tabelle 4 und Tabelle 5 aufgeführten, identifizierten relevanten Projekte wurden auf die abgedeckten Forschungsthemen hin untersucht und diese thematisch in Clustern gebündelt und projektübergreifend ausgewertet. Ziel war es, gemeinsame technologische Schwerpunkte, Entwicklungslogiken sowie Reifegradniveaus sichtbar zu machen, um ein klareres Bild von der derzeitigen FuE-Landschaft zu gewinnen.

Die in Tabelle 6 dargestellten F&E-Themencluster repräsentieren somit Entwicklungsthemen, die sich über mehrere Vorhaben hinweg wiederfinden. Die Tabelle zeigt auf, welche der betrachteten Vorhaben sich mit welchen identifizierten F&E-Clustern befassen und gibt als Orientierung eine Einschätzung des Einzeltechnik-TRLs je F&E-Cluster und Vorhaben. Dabei ist zu beachten, dass diese Einschätzungen auf den teilweise nur in geringem Umfang vorhandenen, öffentlich zugänglichen Informationen zu den Vorhaben beruhen. Dies bedeutet, dass die in Tabelle 6 gezeigten Zuordnungen nicht vollständig sein müssen: so könnte es durchaus sein, dass ein Projekt einem F&E-Themencluster nur deshalb nicht zugeordnet ist, weil die Adressierung der betreffenden Forschungsthemen in den wenigen verfügbaren Informationen nicht hinreichend klar angesprochen wird.

Tabelle 6: Forschungsthemen, F&E-Themencluster, und Einzeltechnik-TRLs der identifizierten F&E-Vorhaben¹²

F&E-Themencluster	Technischer Fokus / Forschungsthemen	Projekte inkl. Abschätzung des TRL Start-Ende (Einzeltechnik-TRL)
LIBS-basierte Elementanalyse inklusive Oberflächenvorbereitung	Laserablation, Oxid- und Beschichtungsentfernung, Stabilisierung der Plasmaerzeugung, Sensitivitätssteigerung und Reproduzierbarkeit für Begleit- und Legierungselemente	COLA I (TRL 2-4); COLA II (TRL 3-5); HILDE (TRL 4-6); ready2sort (TRL 5-7); CAESAR (TRL 4-6); REVaMP (TRL 5-7)
Dynamische Inline-Messung mit LIBS	LIBS-Messung bewegter Schrottstücke bei hohen Durchsätzen, zeitkritische Signalverarbeitung, Synchronisation von Messung, Klassifikation und Sortieraktori	COLA II (TRL 4-6); HILDE (TRL 4-6); ready2sort (TRL 5-7)
Entwicklung multisensorischer Messsysteme (mit LIBS)	Kombination von LIBS mit XRF/XRT/VIS/hyperspektraler Bildgebung zur Robustheitssteigerung und Reduktion von Fehlklassifikationen	CAESAR (TRL 4-6); MEDALS (TRL 3-5); CiSMA (TRL 3-5); PURESCRAP (TRL 3-5)
Entwicklung multisensorischer Messsysteme (ohne LIBS)	Explizit LIBS-freie Sensorik (XRF/XRT, optisch, hyperspektral, elektromagnetisch) und deren Kombination zur Charakterisierung von Schrott	PURESCRAP (TRL 4-6); HIYIELD (TRL 4-6); CiSMA (TRL 3-5); MEDALS (TRL 3-5)
KI / Machine Learning & datengetriebene Informationsfusion	ML-basierte Klassifikation von Schrott und Legierungsidentifikation, Multisensorische Datenerfassung und datenbasierte Informationsfusion, probabilistische Entscheidungsunterstützung bei unscharfen oder verrauschten Sensorsignalen	PURESCRAP (TRL 4-6); CAESAR (TRL 4-6); HIYIELD (TRL 4-6); CiSMA (TRL 3-5)
Echtzeit-Datenverarbeitung & Regelung	Echtzeitfähige ¹³ Kopplung von Sensorik, Entscheidungslogik und Sortieraktori, Latenzminimierung und robuste Regelstrategien im industriellen Umfeld	COLA II (TRL 4-6); HILDE (TRL 4-6); ready2sort (TRL 5-7); REVaMP (TRL 5-7)

¹² **Transparenzhinweis:** Diese Tabelle wurde unter Zuhilfenahme von KI erstellt.

¹³ Echtzeitfähigkeit bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, Messdaten innerhalb eines vorgegebenen, zwangweise immer einzuhaltenden Zeitfensters in belastbare Entscheidungen zu überführen. Hier: Die zwingend einzuhaltende Zeit zwischen Sensormessung bis zur Schaltung der Sortieraktori.

Industrielle Prozessintegration	Einbindung sensorgestützter Sortierung in Recycling- und Stahlwerksprozesse (z. B. EAF-Beschickung), Anpassung an bestehende Stoffstrom- und Qualitätslogiken	COLA II (TRL 4–6); ready2sort (TRL 5–7); CAESAR (TRL 4–6); PURESCRAP (TRL 4–6); MEDALS (TRL 3–5)
Skalierung, Robustheit und Retrofit	Dauerbetrieb unter industriellen Bedingungen, Zuverlässigkeit, Wartbarkeit und Nachrüstbarkeit bestehender Sortier- und Recyclinganlagen	ready2sort (TRL 6–7); REVaMP (TRL 5–7); CAESAR (TRL 5–6)
Begleitelemente und Wirkungen auf die Qualität von Stahlgütern	Charakterisierung und qualitätsbezogene Bewertung schwer entfernbarer Begleitelemente (insb. Cu, Sn, Ni, Cr), Bewertung der Auswirkungen auf Stahleigenschaften und Einsatzgrenzen	COLA I (TRL 2–4); PURESCRAP (TRL 4–6); CiSMA (TRL 3–5); MEDALS (TRL 3–5); NANO-S-MART (TRL 2–4)
Umwelt-, Stoffstrom- & Systemeffekte	CO ₂ -Minderung, Ressourceneffizienz, stoffstrombasierte und systemische Wirkungen verbesserter Sortierung auf Recycling- und Produktionssysteme	PURESCRAP (TRL 4–6); CAESAR (TRL 4–6); MEDALS (TRL 3–5)

Die F&E-Cluster in Tabelle 6 weisen darauf hin, dass die identifizierten Projekte grundsätzlich die technologische Bandbreite der Entwicklung sensorgestützter Sortiersysteme umfänglich, aber nicht notwendigerweise vollständig und in technologischer Tiefe abschließend, abbilden. Diese Bandbreite reicht von den elementanalytischen Grundlagen des Sensoreinsatzes über multisensorische Mess- und Datenverarbeitungskonzepte bis hin zur industriellen Integration, Skalierung und systemischen Bewertung. Aus der Zuordnung der Vorhaben zu den Themenclustern lässt sich die besondere Rolle von LIBS klar erkennen: nur wenige Vorhaben verzichten ganz auf LIBS als Sensortechnik. Dies sind einerseits NANO-S-MART, das auch keinen direkten Bezug zu sensorgestützten Sortierung hat sondern sich mit metallurgischen Verfahren zur Schrottaufbereitung befasst, und andererseits HIYIELD, das ausschließlich auf Nicht-LIBS-Sensorik setzt. Das Cluster „Entwicklung multisensorischer Messsysteme (mit LIBS)“ führt Vorhaben auf, welche die Entwicklung sensorgestützter Analyseverfahren mit LIBS als zentraler Sensortechnik zur elementaren Charakterisierung einsetzen. Das Cluster „Entwicklung multisensorischer Messsysteme (mit LIBS)“ hingegen benennt Vorhaben, die ausschließlich LIBS-freie sensorgestützte Verfahren vorantreiben, oder diese zusätzlich zu den LIBS-zentrierten Analyseverfahren verfolgen.

Anschließend werden diese F&E-Cluster technischen Phasen der Systementwicklung für „sensorgestützte Schrottsortiersysteme“ zugeordnet. Tabelle 7 verdeutlicht die Entwicklungslogik für „sensorgestützte Schrottsortiersysteme“ und ordnet den Entwicklungsphasen zur Orientierung den für die jeweilige Phase typischen System-TRL zu. Dieser System-TRL ist methodisch von dem Einzeltechnik-TRL in Tabelle 6 zu unterscheiden. Ziel von Tabelle 7 ist es, die Rolle der einzelnen F&E-Cluster in den jeweiligen Entwicklungsphasen transparent zu machen und den Beitrag technologischer Fortschritte auch im zeitlichen Ablauf zur Reife des Gesamtsystems nachvollziehbar darzustellen.

Tabelle 7: Einordnung der F&E-Themencluster entlang von Entwicklungsphasen des Systems "sensorgestützte Schrottsortierung"¹⁴

Entwicklungsphase	System-TRL (Orientierung)	Charakteristik der Entwicklungsphase (Gesamtsystem)	Zentrale F&E-Themencluster	Beitrag der Cluster zur Systementwicklung
Phase 1: Grundlagen & sensorische Machbarkeit	TRL 2–3	Nachweis der prinzipiellen Eignung sensorgestützter Verfahren zur elementanalytischen Charakterisierung von Stahlschrott unter Laborbedingungen	LIBS-basierte Elementanalyse inkl. Oberflächenvorbereitung (Begleitelemente und Wirkungen auf die Qualität von Stahlgüten – hier einzuordnen, aber nicht Teil der Systementwicklung „sensorgestützte Sortierung“)	Nachweis der Detektierbarkeit relevanter Begleit- und Legierungselemente (z. B. Cu, Sn, Ni, Cr); Verständnis von Matrix-, Oxid- und Oberflächeneffekten
Phase 2: Sensorische Integration & algorithmische Grundlagen	TRL 3–4	Kombination einzelner Sensoren und erste datenbasierte Klassifikationsansätze; Labor-/Technikumsumgebung	Entwicklung multisensorischer Messsysteme (mit / ohne LIBS) KI / Machine Learning & datengetriebene Informationsfusion	Robustheitssteigerung durch Kombination komplementärer Sensordaten; Entwicklung erster Klassifikations- und Entscheidungsmodelle
Phase 3: Dynamische Inline-Fähigkeit & Teilprozesskopplung	TRL 4–5	Sensorik arbeitet an bewegtem Material; zeitkritische Verarbeitung; Kopplung einzelner Systemkomponenten	Dynamische Inline-Messung mit LIBS Echtzeit-Datenverarbeitung & Regelung	Übertragung der Sensorik auf hohe Durchsätze; Synchronisation von Messung, Klassifikation und Aktorik unter quasi-industriellen Bedingungen
Phase 4: Prototypische Sortiersysteme & Prozessintegration	TRL 5–6	Demonstration eines integrierten Sortiersystems in relevanter Umgebung (Pilot- oder Demonstratoranlage)	Industrielle Prozessintegration (inkl. Echtzeit-Datenverarbeitung & Regelung)	Einbindung in reale Stoffströme (z. B. Schrottaufbereitung, EAF-Beschickung); Anpassung an bestehende Prozess- und Qualitätslogiken
Phase 5: Industrielle Demonstration & Skalierung	TRL 6–8	Stabiler Dauerbetrieb unter industriellen Randbedingungen; Nachweis von Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit	Skalierung, Robustheit und Retrofit	Validierung von Langzeitstabilität, Wartbarkeit und Nachrüstbarkeit bestehender Anlagen

¹⁴ **Transparenzhinweis:** Diese Tabelle wurde unter Zuhilfenahme von KI erstellt.

Phase 6: Industrielle Anwendung	TRL 9	Breiter industrieller Einsatz als Stand-der-Technik	(keine primäre F&E-Phase zuzuordnen)	Ergebnis erfolgreicher Skalierung, Integration und wirtschaftlicher Tragfähigkeit
Querliegend / ergänzend: Systemische Bewertung & Stoffstrom- und Markteffekte		Bewertung der Systemwirkungen über die Sortierfunktion hinaus	Umwelt-, Stoffstrom- & Systemeffekte	Quantifizierung von CO ₂ -Minderung, Ressourceneffizienz und stoffstrombezogenen Effekten als Voraussetzung für regulatorische und marktliche Entscheidungen

Die Phasen 1 bis 5 bilden die technische Systementwicklung ab, Phase 6 die industrielle Anwendung. Querliegend hierzu sind techno-ökonomisch-ökologische Analysen zur Wirkung der (potenziellen) Diffusion des technischen Systems. Diese Analysen begleiten die eigentliche technische Systementwicklung und können wichtige Funktionen für die Sichtbarkeit der technischen Lösung, regulatorische Anpassungen oder die (Weiter-)Entwicklung von Fördermaßnahmen haben, sind jedoch nicht im engeren Sinne Teil der technischen Systementwicklung.

KI- und datengetriebene Methoden (Phase 2) dienen primär der Modellbildung, Parametrisierung und Absicherung von Entscheidungslogiken, während die Echtzeit-Datenverarbeitung (Phase 3) die operative Umsetzung im Sortierprozess übernimmt.

Technische Weiterentwicklung am Markt verfügbarer Systeme

Im Gespräch mit dem Vertreter der cleansort GmbH wurden folgende Aspekte identifiziert, die als primär für die technische Weiterentwicklung der LIBS-Sortiersysteme eingeschätzt werden:

- Die genaue Bestimmung der Gewichte der einzelnen Schrottteile während des Sortiervorgangs. Herausfordernd sind die sehr diversen Strukturen der Schrottteile
- Speziell für cleansort als Unternehmen ist die Analyse nicht nur des Grundmaterial des Schrotts, sondern auch der Beschichtungen als Grundlage für weitere Sortieroptionen für die Kunden ein relevantes Thema, an dem gearbeitet wird
- Trade-Offs bestehen für LIBS-Systeme in der Abwägung zwischen Repräsentativität der Punktmessung einerseits und dem möglichst hohen Materialdurchsatzes andererseits. Mit einer höheren Anzahl von Messungen pro Schrottteil kann die Analysequalität verbessert werden, dies reduziert aber den Durchsatz. Hier wird an der Optimierung gearbeitet.

Markt: Anbieter sensorgestützter Sortiersysteme

Es sind bereits Hersteller auf dem Markt, die für Recycler / Schrottaufbereiter oder Schrottnutzer sensorgestützte Sortiersysteme anbieten. Tabelle 8 stellt die identifizierten europäischen Anbieter dar. Während die deutsche cleansort GmbH ausschließlich LIBS-basierte Sortiersysteme anbietet und die SICON GmbH auf XRF setzt, bieten Steinert, TOMRA und Binder+Co Sortiersysteme auf Basis verschiedener oder mehrerer Sensortypen. Es zeigt sich, dass die angebotenen LIBS-Systeme ausschließlich oder zumindest fokussiert für die Sortierung von Aluminiumschrotten nach spezifischen Aluminiumlegierungen vermarktet werden, und nicht oder zumindest nicht explizit für die Sortierung von Stahlschrotten. Die Marktreife dieser Systeme steht daher auch nicht im Widerspruch zu den oben identifizierten und beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen für die Anwendung sensorbasierter Sortiersysteme für die Stahlschrottsortierung.

Die Sortierung von Aluminium bietet, nach Aussagen des befragten Vertreters der cleansort GmbH, aktuell den größeren ökonomischen Anreiz gegenüber Stahl, da der auf dem Markt zu erzielende Preis von Aluminiumschrotten sehr stark davon abhängt, ob die Schrotte nach Legierungen – ein typisches Beispiel ist die Trennung nach den Aluminiumlegierungen 5000 und 6000 – sortiert sind oder nicht.

Sowohl Metallproduzenten als auch Metallrecycler sind prinzipiell Anwender und Kunden von sensorbasierten Sortiersystemen, so der Vertreter der cleansort GmbH. Typischerweise sind aber eher Recycler Kunden für solche Systeme. Grundsätzlich gilt aber: je näher am Schmelzprozess die Sortierentscheidung getroffen wird, desto spezifischer kann mit Hilfe sensorgestützter Sortierung das Inputmaterial auf die gewünschte Zusammensetzung hin optimiert werden.

Tabelle 8: Europäische Anbieter von sensorgestützten Sortiersystemen für das Metallrecycling

Staat	Anbieter	Sensor-/Technologie-Typ	Zielmarkt / Einsatzschwerpunkt Status Quo
Deutschland	cleansort GmbH	LIBS-basierte Sortiersysteme zur Legierungsanalyse (z.B. "KeyLIBS")	Metallschrottsortierung – modular einsetzbar; kommerziell aktuell primär für Sortierung von Aluminiumlegierungen
Deutschland	SICON GmbH	XRF-basierte Online-Elementanalyse (keine nachgelagerte Sortierung) vor dem Schrotteinsatz	Charakterisierung von Stahlschrott vor dem Einsatz im Stahlwerk
Deutschland	Steinert GmbH	Sensorgestützte Sortiermaschinen auf Basis unterschiedlicher Technologien: NIR, Induktion, XRT, XRF, LIBS, VIS	Sensorgestützte Sortierung für Recycling- und Metallfraktionen; LIBS-Anlage ("STEINERT PLASMAX") wird speziell für Aluminiumlegierungen vermarktet; XRF-Anlagen auch für Stahlschredderschrott
Norwegen	TOMRA Sorting Recycling	LIBS (z. B. AUTOSORT™ PULSE), optische & andere sensorbasierte Systeme	Sensorbasierte Sortierung im Recycling; LIBS ("Dynamic LIBS") speziell für Aluminiumlegierungen vermarktet
Österreich	Binder+Co AG	Sensorgestützte Sortiersysteme auf Basis von VIS, NIR, Induktion, Multi-Sensorik, LIBS	Sensorbasierte Sortiermaschinen ("Clarity") inklusive LIBS-Modul; LIBS speziell für Aluminiumschrotte vermarktet

Markt: Anbieter von hochaufbereitetem Stahlschrott durch sensorgestützte Sortierung

Mit der deutschen TSR Group GmbH & Co. KG ist ein Unternehmen auf dem Markt, das mit TSR40 ein hochaufbereitetes Produkt aus Stahlschrott als Eisenträger für Stahlunternehmen anbietet. Das Unternehmen wirbt damit, dass TSR40 zu 100% aus post-consumer-Material, das heißt aus Altschrott, hergestellt wird. Es wird ein Eisengehalt von mindestens 98% und ein „minimaler“ Anteil für die Begleitelemente Kupfer, Nickel, und Chrom genannt, ohne dass dieser Anteil näher spezifiziert wird. Bislang gibt es einen Produktionsstandort in Duisburg, weitere Anlagen in Magdeburg und Amsterdam sollen „zeitnah“ folgen; mittelfristiges Ziel ist eine europaweite Abdeckung. (TSR Group GmbH & Co. KG, o. J.). Die TSR-Recyclinganlage in Duisburg verfügt über eine Verarbeitungskapazität von 450.000 Tonnen Inputmaterial pro Jahr und wurde 2023 in Betrieb genommen (Schmidt, 2023).

Die Verfahrensentwicklung wurde mit dem durch das Land NRW im Rahmen des Förderprogramms progres.nrw – Innovation geförderten Forschungsvorhaben REDERS („Reduzierte CO₂-Emissionen durch Erhöhung der Recyclingquote bei der Stahlherstellung“) vorangetrieben. Das Vorhaben war eine Kooperation zwischen TSR, dem VDEh-Betriebsforschungsinstitut (BFI) und thyssenkrupp sowie Hüttenwerke Krupp Mannesmann (HKM). (TSR Group GmbH & Co. KG, 2021).

Welche Sensorsysteme in dem von TSR genutzten Verfahren für die Herstellung von TSR40 exakt eingesetzt werden, ist nicht klar. Anhaltspunkte liefert jedoch die Patentschrift (Blackert & Brümmer, 2023). Diese hält zu den genutzten Sensorsystemen fest:

„(...) mit einer oder mehr, bevorzugt zwei oder mehr, unterschiedlichen Methoden erfolgt, die ausgewählt sind aus der Gruppe bestehend aus Röntgenfluoreszenzanalyse, optischer Bilderkennung, bevorzugt unter Einsatz von künstlicher Intelligenz, und IR-Absorptionsspektroskopie, insbesondere NIR-Absorptionsspektroskopie. Hierbei dient die Röntgenfluoreszenzanalyse beispielsweise der Bestimmung des Elementgehalts und die IR/NIR-Absorptionsspektroskopie beispielsweise der Bestimmung des Organikgehalts.“

Hieraus lässt sich zumindest schließen, dass hier keine LIBS-Systeme zum Einsatz kommen, d.h. eine exakte Elementanalyse findet vermutlich nicht statt. Um dennoch die Spezifikationen des Outputs garantieren zu können, lässt sich daher vermuten, dass nicht beliebiger Altschrott als Input genutzt wird, sondern schon gewisse Qualitätsansprüche an die Charakteristik des eingesetzten Materials im Einkauf gestellt werden.

4.3.2 Metallurgische Ansätze zur Aufbereitung von Stahlschrotten

Metallurgische Ansätze zur Aufbereitung von Stahlschrotten umfassen verschiedene Verfahren, mit denen Begleit- oder Legierungselemente aus dem Altschrott entfernt werden können; hierbei werden Differenzen in den physikalischen oder chemischen Eigenschaften zwischen der Eisenmatrix und den jeweiligen Begleit- oder Legierungselementen genutzt. Entsprechend der Vielzahl an physikalischen und chemischen Eigenschaften der Elemente ergibt sich eine Vielzahl theoretischer Ansatzpunkte für metallurgische Verfahren, die – prinzipiell – von Stahlherstellern genutzt werden könnten. Einen sehr breiten Überblick bietet die Metastudie (Daehn et al., 2019), die jedoch wiederum „nur“ das Entfernen von Kupfer aus Stahlschrott thematisiert. Aus der Studie zeigt sich, dass die metallurgischen Ansätze – im Gegensatz zu der in Kapitel 4.3.1 dargestellten sensorgestützten Sortierung – eine insgesamt geringe (bzw. unsichere, da die untersuchte Literatur teilweise Jahrzehnte alt ist) technische Reife bei zugleich absehbar hohen Energieaufwänden und damit Kosten aufweisen. Die sensorgestützte Sortierung erscheint daher kurz- bis mittelfristig deutlich vielversprechender. Im Folgenden werden daher die zentralen in (Daehn et al., 2019) dargestellten Ansätze nur kurz und in Auswahl andiskutiert.

Zur Zeit ist die Standardmethode, um metallurgisch den Gehalt an Verunreinigungen zu kontrollieren, eine oxidierende Schlacke. Wie bereits erwähnt, ist Kupfer in Relation zu Eisen zu edel, um oxidativ entfernt zu werden. Thermodynamische Überlegungen zeigen, dass Kupfer grundsätzlich von der Eisenmatrix separiert werden kann, allerdings nicht mit den gegenwärtig gängigen oxidativen Verfahren. Der Ansatz in (Daehn et al., 2019) ist es daher, systematisch verschiedene Methoden zur Separation von Kupfer zu betrachten und die für diese Verfahren auffindbare Literatur strukturiert auszuwerten. Die im Folgenden genannten Verfahren können hier nicht abschließend betrachtet werden, insbesondere nicht bezüglich ihrer technischen Reife z.B. entlang von TRL (dies geschieht auch in (Daehn et al., 2019) nicht).

Ein grundlegender Unterschied zwischen den Verfahren, die auf Stahlschrott im festen Zustand und solchen, die auf die Schmelze angewandt werden, ist, dass letztere auch Kupfer entfernen können, das in der Eisenmatrix gebunden ist, d.h. sich in einem vorhergehenden Schmelzprozess mit dem Eisen verbunden hat. Verfahren die beim festen Stahlschrott ansetzen können hingegen nur separiertes Kupfer aus dem Stahlschrott-Gemenge entfernen. Die Verfahren, die bei der Schmelze ansetzen, sind jedoch energieintensiver. Hier besteht ein grundlegender Tradeoff.

Verfahren für die Stahlschmelze

Kupfer hat einen höheren Dampfdruck als Eisen, sodass es aus der Stahlschmelze herausdestilliert werden könnte. Das Verfahren wäre hierbei die **Vakuumdestillation**. Die Vakuumbehandlung ist ein gängiges Verfahren der Sekundärmetallurgie. Allerdings geht es bei diesem um die Entgasung des flüssigen Rohstahls, um gelöste Gase wie Stickstoff, Wasserstoff und Sauerstoff aus der Schmelze zu entfernen um spätere negative Wirkungen im festen Stahl (z.B. Wasserstoffversprödung) zu vermeiden (Höfler, o. J.). Das von (Daehn et al., 2019)¹⁵ identifizierte Verfahrensbeispiel nutzt eine Pfanne mit einem Fassungsvermögen von 160 Tonnen Schmelze bei einer Schmelztemperatur von 1.600°C und einer Durchmischung der Schmelze mit Inertgas (bubbling mit Argon). Das Batchverfahren hat eine Dauer von 130 Minuten und könnte den Kupfergehalt der Schmelze auf 0,1 wt.-% reduzieren (der Ursprungsgehalt an Kupfer, der hier zu Grunde gelegt wurde, ist allerdings unbekannt). Der Energiebedarf pro Tonne mit diesem Verfahren behandelte Schmelze wird auf 81 - 152 kWh/t geschätzt – dies ist in Relation zum typischen

¹⁵ Zu den von Daehn et al. genutzten Primärquellen siehe die Angaben dort.

Energiebedarf des Elektrolichtbogenofens zu betrachten, der in einer Bandbreite von ca. 400 – 600 kWh/t liegt. Der zusätzliche Energiebedarf läge also in einer Größenordnung von ca. 20%.

Das **Vakuumschmelzen**, genauer das **VAR-Verfahren** (Vacuum Arc Remelting = Vakuum-Lichtbogenumschmelzen), ist ebenfalls ein in der Metallurgie bereits bekanntes Verfahren (Härtetechnik Hagen GmbH, o. J.). Dabei wird ein Metallblock, in unserem Fall Stahl mit enthaltenen unerwünschten Verunreinigungen, als Elektrode eines Lichtbogenofens im Vakuum platziert. Durch den Lichtbogen schmilzt die Elektrode ab, und die Verunreinigungen verdampfen, oder schwimmen als Schlacke auf der Oberfläche der entstehenden Schmelze auf. Nach (Dworak et al., 2023) kann Kupfer mit dem VAR-Verfahren sicher aus der Stahlmatrix entfernt werden. Allerdings ist der Prozess sehr zeit- und extrem energieintensiv und wird daher derzeit ausschließlich für hochqualitative, niedrig-volumige Spezialstähle angewandt, die eine Abdeckung der hohen Zusatzkosten erlauben. Nach (Daehn et al., 2019) beträgt die realisierbare Schmelzrate lediglich 9kg/min, und der zusätzliche Energieaufwand liegt bei 700-1.100 kWh/t. Dieses Verfahren kann für die Aufbereitung von Massenstählen daher mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

In Relation realistischer erscheint hingegen das **Sulfid-Schlackeverfahren** (sulfid slagging). Ähnlich wie beim unten beschriebenen Sulfid-Matte-Verfahren macht man sich hier die hohe Verbindungsneigung von Kupfer mit Schwefel zu nutze, wobei hier Schmelze mit Schmelze in Verbindung gebracht wird. Als Schlackebildner könnte dabei beispielsweise ein Eisen-Sulfid / Aluminium-Sulfid Gemisch, $\text{FeS-Na}_2\text{S}$, zum Einsatz kommen. Durch die hohe Affinität des Kupfers zu Schwefel bildet sich Kupfersulfid, Cu_2S , das dann separiert werden kann. Wie beim Sulfid-Matte-Verfahren ergibt sich jedoch eine Kontamination der Stahlschmelze mit Schwefel, die wiederum beseitigt werden muss, woraus sich ein nicht unerheblicher verfahrenstechnischer Zusatzaufwand ergibt. Darüber hinaus erfordert die Behandlung in einem Pfannenofen bei 1.365°C eine Aufkohlung der Schmelze, um die Aktivität des Kupfers zu erhöhen und eine niedrigere Schmelztemperatur zu ermöglichen, welche die Reaktion zwischen Kupfer und Schwefel in der Schmelze erhöht. Insgesamt geben den zusätzlichen Energiebedarf für den 50-minütigen Batchprozess, der grundsätzlich eine Reduktion des Kupfergehalts in der Stahlschmelze auf 0,1 wt.-% erlaubt, mit 155 – 196 kWh/t an (inklusive Entschwefelung).

Verfahren für Stahlschrott im festen Zustand

Kupfer hat eine hohe Affinität zu Schwefel, das heißt eine hohe Neigung, sich unter Anwesenheit von Schwefel exotherm mit diesem zu verbinden, beispielsweise zu Kupfer-I-Sulfid (Cu_2S) oder Kupfer-II-Sulfid (CuS). Hier setzt die **Sulfid-Matte-Extraktion** an. Dem im festen Stahlschrott frei vorliegenden Kupfer wird hierbei ein sulfidischer Reaktionspartner in liquidem Zustand angeboten, bei (Daehn et al., 2019) wird hierfür eine Mischung aus Eisensulfid und Natriumsulfid ($\text{FeS-Na}_2\text{S}$ -Matte¹⁶) diskutiert. Die Zugabe der Schmelze und deren Vermengung mit dem Schrott erfolgt in einem Drehrohrofen. Bei der Reaktion des festen Kupfers mit der Schmelze entsteht Kupfersulfid, nach (Jimbo et al., 1992) wird ein Reaktionsgleichgewicht erreicht, wenn 50 wt.-% CuS in der Schmelze vorliegen. Pro Tonne Stahlschrott werden 10kg $\text{FeS-Na}_2\text{S}$ -Matte bei einer Temperatur von 1.000°C eingesetzt, das Batchverfahren dauert ca. 15 Minuten und eine Reduktion des Kupfergehalts im Schrott auf 0,1 wt.-% erscheint möglich. Ein klarer Vorteil des Verfahrens gegenüber anderen Ansätzen ist der relativ geringe Energieeinsatz. Das Verfahren selbst benötigt ca. 20 – 34 kWh/t, allerdings kommt es zur Kontamination des Stahlschrotts mit Schwefel, der wiederum entfernt werden muss. Hierfür werden zusätzlich 20 – 30 kWh/t veranschlagt. Ein Nachteil

¹⁶ Matte = Bezeichnung für geschmolzene Metallsulfide in der Pyrometallurgie.

des Verfahrens ist der verfahrenstechnische Aufwand: die zusätzliche Behandlung im Drehrohrofen, das Handling der FeS-Na₂S-Matte, sowie die zusätzliche Desulphurisation.

Eine weitere Option ist das **Herauslösen von Kupfer (leaching)** mittels Laugen oder Säuren. Die höchste Selektivität für Kupfer, und laut (Daehn et al., 2019) daher auch die höchste Aufmerksamkeit in der Forschung, haben Laugen auf Ammoniakbasis, wie Ammoniakcarbonat ((NH₄)₂CO₃), Ammoniumchlorid (NH₄Cl), und Ammoniumsulfat ((NH₄)₂SO₄). Das Kupfer geht in Lösung, während sich Eisen inert verhält. Die Lösungen unterscheiden sich in ihrer Reaktionsrate sowie in den verfahrenstechnischen Parametern wie z.B. der Prozesstemperatur. Generell findet das leaching bei niedrigen Temperaturen, z.B. bei 80°C für Ammoniumcarbonat und Ammoniumchlorid, statt. Für Ammoniumsulfat wird Raumtemperatur / 25°C angegeben. Ein Nachteil ist die sehr lange Verweildauer: der leaching-Prozess dauert 12 bis 24 Stunden pro Charge. Es können resultierende Kupfergehalte im Schrott von 0,2-0,1 wt.-% erreicht werden. Der Energiebedarf wird mit 70 – 105 kWh/ t für Ammoniakcarbonat, 45 – 70 kWh/t für Ammoniumchlorid, und 81 – 125 kWh/t für Ammoniumsulfat abgeschätzt.

5 Techno-ökonomischer Vergleich von Stahlprozessen mit und ohne Altschrottnutzung, Substitutionspotenzial

Vorgehen

Mit Hilfe einer techno-ökonomischen Analyse kann die Wirtschaftlichkeit und deren Entwicklung über die Zeit für verschiedene Stahlproduktionsrouten abgeschätzt und miteinander verglichen werden. Für den vorliegenden Fall betrifft dies den Vergleich zwischen der zukünftigen Wasserstoff-basierten Produktionsroute (H₂-DR-EAF) mit keinem oder geringem Schrotanteil als Eisenträger mit einer Produktionsroute, die in hohem Maße oder ausschließlich aufbereiteten Altschrott als Eisenträger einsetzt. Idealerweise liegen hierfür CAPEX und OPEX für die zusätzliche Aufbereitung, d.h. für die zusätzliche sensorbasierte Schrottsortierung (siehe Kapitel 4.3) gegenüber einem angenommenen Standardverfahren, vor. Diese Daten sind jedoch aktuell nicht verfügbar. Auch in den öffentlich zugänglichen Dokumenten zu den untersuchten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben finden sich keine Informationen, aus denen Rückschlüsse auf die zusätzlichen CAPEX und OPEX für eine sensorbasierte Sortierung gezogen werden könnten.

Daher wird hier ein anderer Ansatz verfolgt: die Produktionsrouten mit hohen Anteilen an Altschrott werden ohne die anfallenden zusätzliche CAPEX und OPEX für die zusätzliche sensorbasierte Schrottsortierung analysiert. Aus der sich ergebenden Produktionskostendifferenz zu der H₂-DR-EAF-Route soll dann auf die mögliche Wirtschaftlichkeit geschlossen werden.

Für die techno-ökonomische Analyse wird das Modell CaCoCa (The Carbon Contracts Calculator) des Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) eingesetzt, das als open-source Programm zur Verfügung steht (Dürrwächter et al., o. J.) und für die Zwecke dieser Analyse adaptiert wurde. Das Modell berechnet die spezifischen Produktionskosten pro Tonne Produkt (hier Rohstahl) für die jeweils modellierte Produktionsroute pro Stützjahr. Für die techno-ökonomische Analyse sind Inputdaten für die Jahre 2025 bis 2045 erforderlich. Folgende Datentypen werden dem Modell übergeben:

- Spezifische Verbrauchsdaten Energie- und Eisenträger
- Energieträger- und Rohstoff-/Vorproduktpreise
- CO₂-Preise
- Spezifische CAPEX pro Tonne Produktionskapazität
- Zusätzliche OPEX (Spezifische Arbeitskosten)
- Parameter für die Annuisierung der CAPEX
- Produktionskapazität und Produktionsmengen

Die hier genutzten Inputdaten finden sich im Anhang.

Es wurden vier verschiedene Produktionszenarien modelliert:

- Die konventionelle integrierte BF/BOF-Route (Referenz)
- Die H₂-DR/EAF-Route mit 100% DRI- und 0% Schrotteinsatz (Scrap0_DRI100)
- Die H₂-DR/EAF-Route mit 50% DRI- und 50% Schrotteinsatz (Scrap50_DRI50)
- Die Schrott-EAF-Route mit 0% DRI- und 100% Schrotteinsatz (Scrap100_DRI0)

Für die nicht-konventionellen Routen wurden die Input-Parameter jeweils auf eine Minimierung des CO₂-Ausstoßes hin ausgelegt, d.h. insbesondere wurde jeglicher denkbare Erdgaseinsatz (für die Reduktion im Schachtofen, für die Vorwärmung des Wasserstoffs, als Brennergas im EAF) durch Wasserstoff substituiert. Für die erforderliche Aufkohlung im EAF wurde emissionsfreie Biomasse angenommen.

Für den eingesetzten Schrott wurden Altschrottpreise angenommen.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der techno-ökonomischen Analyse lassen sich aus Abbildung 5 ableiten. Alle im Folgenden getroffenen Aussagen sind stark von den Inputdaten (siehe Anhang) und den für diese getroffenen Annahmen abhängig. Relevante Unsicherheiten ergeben sich insbesondere bei den CAPEX sowie den Energieträger-, CO₂- und Rohstoffpreisen.

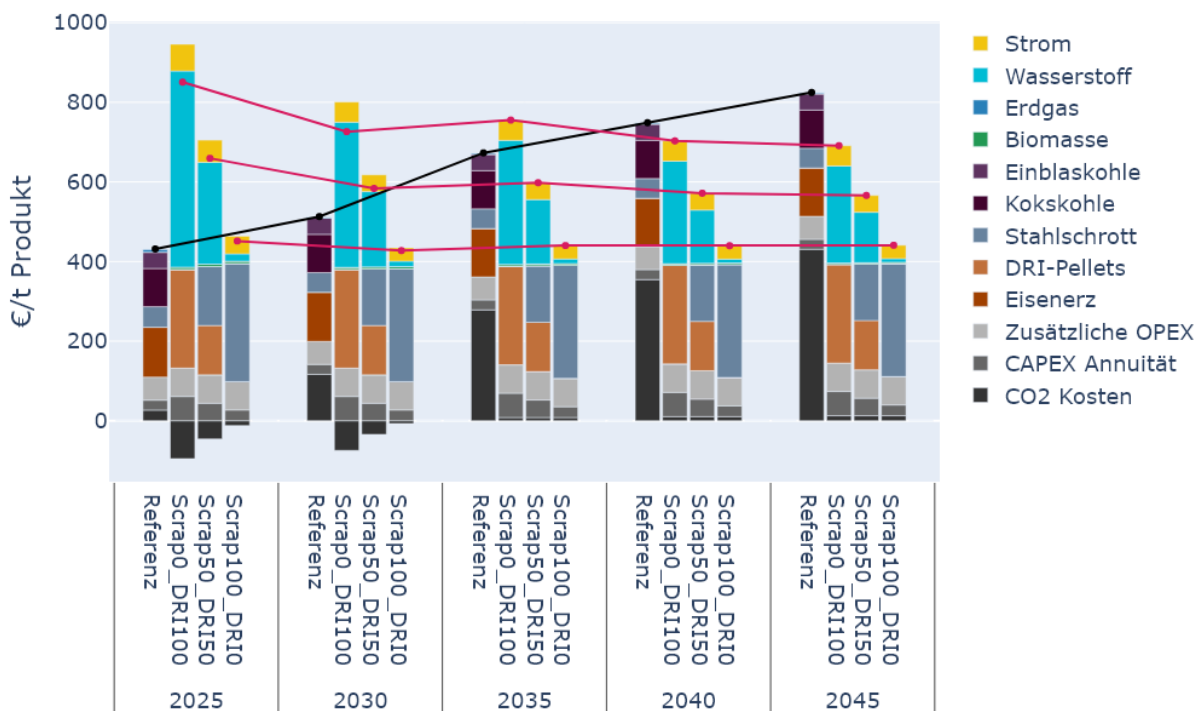


Abbildung 5: Modellierter Produktionskostenvergleich der untersuchten Stahlproduktionsrouten

Es zeigt sich, dass die konventionelle Referenz über die Zeit durch steigende CO₂-Kosten gegenüber den nahezu CO₂-neutralen Routen erheblich an Wirtschaftlichkeit verliert. Bereits heute lägen die Produktionskosten mit einer ausschließlich auf Schrott basierenden Primärproduktion nahezu gleichauf, wenn hier nicht noch die unbekannteren zusätzlichen Aufbereitungskosten für die sensorbasierte Sortierung berücksichtigt werden müssten. Die DRI-nutzenden Routen sind noch deutlich teurer, die Kostendifferenz zur konventionellen Referenz nimmt aber im Zeitverlauf deutlich ab, entscheidende Faktoren hierfür sind die steigenden CO₂-Kosten der Referenz sowie abnehmende Wasserstoffkosten durch sinkende Wasserstoffpreise. Zwischen 2030 und 2035 wird die Route die hälftig auf DRI und Schrotteinsatz setzt (Scrap50_DR150) konkurrenzfähig mit der konventionellen Referenz. Im Jahr 2040 ist dies auch für die DR/EAF-Route ohne Schrotteinsatz

(Scrap0_DRI100) der Fall. Bereits 2030 ist ein klarer Kostenvorteil der reinen Schrottroute gegenüber der fossilen Referenz erkennbar.

Im direkten Vergleich der DR/EAF-Routen und der reinen Schrottroute untereinander ist klar zu erkennen, dass die reine Schrottroute immer einen deutlichen Kostenvorteil hat, bzw. dass die spezifischen Produktionskosten mit höherem Schrottanteil sinken. Kostenseitig handelt es sich letztlich um eine Substitution von Wasserstoff- und DRI-Pelletkosten durch Schrottkosten. Die weiteren Produktionskostenbestandteile sind für den Vergleich der gesamten Produktionskosten relativ unbedeutend.

Ein Sondereffekt in den Ergebnissen sind die negativen CO₂-Kosten der H₂/EAF-Routen in den Stützjahren 2025 und 2030. Neben der erwähnten Minimierung der CO₂-Emissionen dieser Routen durch die Wahl der Inputdaten ist dies darauf zurückzuführen, dass die freie Allokation die Brutto-CO₂-Kosten übersteigt und sich somit Netto negative CO₂-Kosten ergeben. Längerfristig ist dies jedoch nicht relevant, sofern die aktuell geltenden Regularien bezüglich des Phase-In des CBAM und des parallel erfolgenden Phase-Out der freien Allokation Bestand haben. Lediglich in den frühen Jahren einer möglichen DR/EAF-Stahlproduktion ergeben sich bei hohen Wasserstoffanteilen zusätzliche wirtschaftliche Anreize, die jedoch die Kostenlücke zur konventionellen Route nicht schließen können. Sollte das bestehende System aus CBAM-Einführung und Ausphasen der freien Allokation jedoch gelockert werden und die freie Allokation mehr oder weniger auf dem gegenwärtigen Niveau längerfristig für die konventionelle Produktionsroute zur Verfügung stehen, hätte dies deutlich negative Auswirkungen für den business case der DR/EAF/Schrott-Routen und würde die Planungs- und Investitionssicherheit der Unternehmen in der Transformation deutlich verringern.

Abbildung 6 zeigt die ermittelten spezifischen Produktionskostendifferenzen zwischen der Produktion mit 100% DRI / 0% Schrott und der Produktion mit 0% DRI / 100% Schrott. Es muss nochmals darauf hingewiesen werden, dass die zusätzlichen Kosten für eine Aufbereitung des Altschrotts mittels sensorbasierter Sortierung zu einer Qualität, die uneingeschränkt als Eisenträger für die Primärstahlerzeugung in Frage kommt, hier nicht enthalten sind. Die Produktionskostenunterschiede sind jedoch so erheblich, dass von einem sehr deutlichen wirtschaftlichen Anreiz für die Nutzung von Altschrott und von entsprechenden Investitionen in eine sensorbasierte Sortierung ausgegangen werden kann. Die ermittelte Produktionskostendifferenz von 250€ pro Tonne Rohstahl für das Jahr 2045 entspricht rund 36% der ermittelten Produktionskosten für die DR/EAF-Route ohne Schrotteinsatz in diesem Jahr.

Vor dem Hintergrund der erlangten Kenntnisse über das technische Verfahren der sensorbasierten Schrottsortierung erscheint es auch ohne Informationen über die zusätzlichen Kosten nicht plausibel davon auszugehen, dass diese zusätzlichen Kosten die ermittelte Differenz übertreffen könnten.

In dem Gespräch mit einem Vertreter der cleansort GmbH wurde darüber hinaus deutlich, dass die zusätzlichen OPEX als sehr gering angenommen werden können. Demnach liegen die zusätzlichen OPEX für die sensorgestützte Sortierung in einem Bereich von ca. 2€ pro Tonne Sortiergut, entsprechend einem zusätzlichen Strombedarf von ca. 8kWh pro Tonne Input. Dies ist in Relation zu den Energiebedarfen und Kosten der Stahlproduktion insgesamt zu vernachlässigen. Relevante Zusatzkosten ergeben sich also nur aus den CAPEX für die Sensortechnik und deren Integration in das Sortiersystem.

Im Ergebnis lässt sich daher ein deutlicher wirtschaftlicher Anreiz für eine Steigerung des Schrotteinsatzes in der DR/EAF-Route sowie für eine Aufbereitung von Altschrottmengen für den Einsatz zur Primärstahlherstellung ableiten.

Für eine genauere Bewertung ist, neben der Produktionskostenseite und den derzeit nicht näher abschätzbaren CAPEX, für den jeweiligen Einzelfall auch der jeweilige ökonomische Wert des Outputs zu betrachten: dies betrifft das Mengen- und Wertverhältnis der beiden resultierenden Fraktionen.

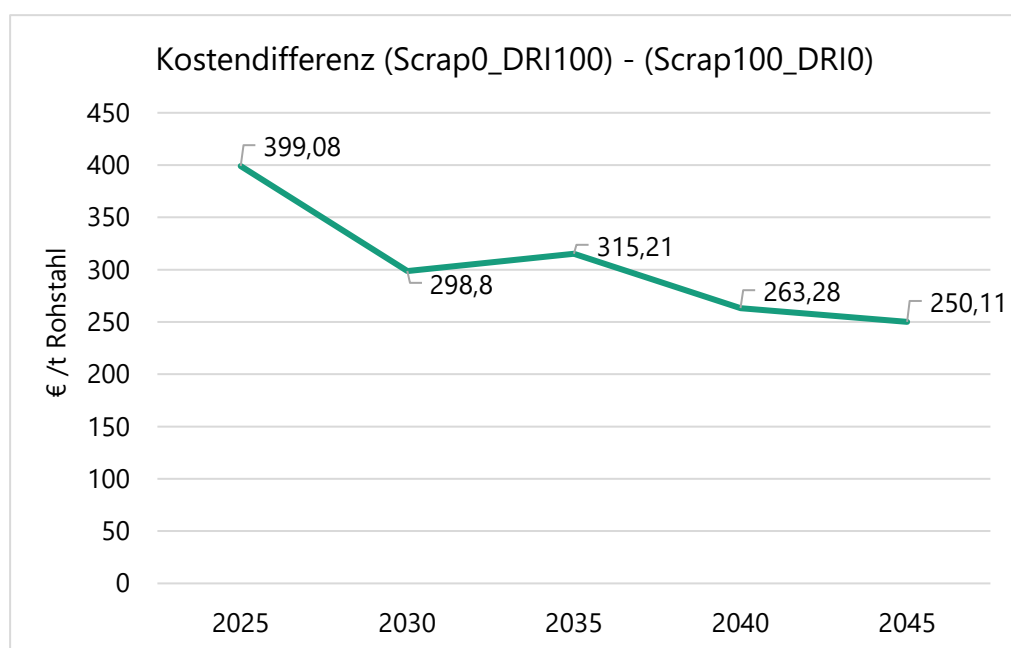


Abbildung 6: Produktionskostendifferenzen zwischen Scrap0_DRI100 und Scrap100_DRI0 im Zeitverlauf

Erste Abschätzung des möglichen Substitutionspotenzials

Im Folgenden wird eine erste Abschätzung des Substitutionspotenzials von Schrotteinsatz gegenüber DRI für die zukünftige Primärstahlherstellung vorgenommen. Diese Abschätzung unterliegt erheblichen Unsicherheiten, zeigt aber das prinzipiell große Potenzial einer gesteigerten Nutzung von Altschrott auf.

Ausgangspunkt sind die Einschätzungen zur Entwicklung der überschüssigen, d.h. nicht selbst genutzten, Altschrottmengen in der EU.

Nach (Dworak et al., 2022), siehe Kapitel 2.2, beträgt der EU-Überschuss derzeit ca. 20 Mio. Tonnen Altschrott und wird bis 2050 auf ca. 43 Mio. Tonnen ansteigen. Im Folgenden wird für 2050 vereinfachend und konservativ von 40 Mio. t Überschuss ausgegangen.

Nimmt man an, dass 2030 10% des derzeitigen Überschusses für die Primärstahlerzeugung und 2050 dann 50% des (dann verdoppelten) Überschusses für die Primärstahlerzeugung genutzt und entsprechend DRI substituieren würde, ergäben sich die in Tabelle 9 zusammengefassten Einsparungen für die Nutzung von Strom und Wasserstoff. Die spezifischen Einsparungen ergeben sich aus den technischen Daten für die spezifischen Energieträgereinsätze, die im Anhang zu finden sind.

Die Annahme einer eher geringen Nutzungsquote von 10% in 2030 und des deutlichen Anstiegs auf 50% in 2050 beruht auf der geringen Zeitspanne, die bis 2030 für den Aufbau von entsprechenden Aufbereitungskapazitäten für den Stahlschrott verbleibt.

Bereits diese erste Abschätzung zeigt ein erhebliches Ressourceneinsparpotenzial, das auch mit einem etwas geringeren Aufbau von Leitungsinfrastruktur für die Transformation der Wirtschaft einhergehen könnte.

Tabelle 9: Abschätzung des Einsparpotenzials durch die Substitution von DRI durch aufbereiteten Altschrott

Spezifische Einsparung		
Strom [MWh/t_Schrott]	0,21	
Wasserstoff [kg/t_Schrott]	71,1	
Einsparpotenzial		
	2030	2050
Strom [TWh/a]	0,42	4,2
Wasserstoff [Mt /a]	0,1422	1,422

Resilienz und Dekarbonisierung im EU-Binnenmarkt vs. Klimaschutz global

Zwischen den Zielen eines globalen Klimaschutzes einerseits und einer Stärkung der Circular Economy, einer kosten- und ressourceneffizienten Dekarbonisierung sowie Stärkung der Resilienz im EU-Binnenmarkt andererseits besteht möglicherweise ein Zielkonflikt. Durch eine verstärkte eigene Nutzung von Stahlschrott könnte der Export in derzeitige Empfängerländer wie insbesondere die Türkei (siehe Kapitel 2.2) zurückgehen, die ihrerseits in ihrer Stahlproduktion eine sehr hohe Abhängigkeit von diesen importierten Stahlschrotten aufweisen. Sollten diese Stahlschrottströme zukünftig nicht mehr im derzeitigen Umfang zur Verfügung stehen, könnte es zu Substitutionseffekten in der dortigen Stahlproduktion kommen, die ggf. das genannte lokale Einsparpotenzial ganz oder teilweise kompensieren. Entscheidend für eine nähere Betrachtung sind folgende Aspekte:

- In welchem Umfang steigt die interne Stahlschrottnutzung in der EU: entlang der wachsenden Altschrottüberschüsse, oder auch auf Kosten der aktuellen Exportmengen?
- Durch welche Produktionsrouten, in welchem Produktionsumfang und mit welchen spezifischen Emissionen würde eine derzeit auf EU-Schrottexporten beruhende Stahlproduktion in den Drittmärkten substituiert?
- Würden die Schrotimpote der EU durch Importe aus anderer Ländern, die zukünftig über deutlich höhere Überschussmengen verfügen als heute (z.B. China) ersetzt?
- Wie hoch sind die spezifischen Emissionen der auf EU-Exporten beruhenden internationalen Stahlproduktion im Status Quo (insbesondere abhängig von den Emissionen des Stromsektors)?

6 Betrachtung von Produktanforderungen

In (Arun et al., 2024) finden sich detailliertere Angaben zu den maximal akzeptablen Gehalten an Begleitelementen für verschiedene Stahlgüten, sowohl für die einzelnen Elemente als auch kumuliert für den Gesamtgehalt an Begleitelementen, siehe Tabelle 10. Besonders strikte Anforderungen werden demnach an die hochqualitativen Stahlgüten ULC-IF (ultra low carbon – interstitial free, ermöglicht höchste Tiefziehfähigkeit), DDQ (Deep Drawing Quality, hohe Tiefziehfähigkeit) gestellt. Diese sind insbesondere im Automobilbereich sehr relevant. In dieser Abstufung als mittlere Qualitäten einzustufende Stahlgüten („Drawing“ für einfachere Tiefziehgüten, sowie „Commercial“ für verschiedene mittlere Qualitäten und „Fine wire“ für kaltgezogenen Feindraht) haben geringere Grenzwerte bzgl. des Gehalts an Begleitelementen; für Baustähle („Structural“ und „Rebar“) nehmen die Anforderungen weiter ab, hier können Stahlschrotte umfangreich eingesetzt werden. In (Arun et al., 2024) wird nicht erläutert, wie die genannten Grenzwerte abgeleitet werden, als Primärquelle wird eine nicht auffindbare Arbeit aus dem Jahr 2003 genannt. Die dort genannten Werte werden jedoch auch in anderen Fachpublikationen aufgeführt, beispielsweise in einem Konferenzpapier aus dem Jahr 2006 (Zulhan et al., 2006). Es handelt sich daher nicht um genormte, sondern um in der Fachcommunity als „typisch“ akzeptierte Werte. In (Martinsen, o. J.) wird ein Stahlhersteller paraphrasiert; nach dessen Angaben verlangt die Automobilindustrie für Flachstahlerzeugnisse einen maximalen Grenzwert für Kupfer von 0,1 wt.-% und für kritische Strukturelemente wie die Rohkarosserie noch tiefere Grenzwerte von bis zu 0,06 wt.-%. Dieselben Werte werden auch in (Transport & Environment (T&E), 2025) genannt. Diese Angaben liegen zwischen den Werten in Tabelle 10 für hochqualitative Güten und dem unspezifischen Grenzwert von $\leq 0,2 \%$ aus (ESB Quality Guide V1.1 VDA239-100, o. J.), siehe unten.

Tabelle 10: Grenzwerte in [wt.-%] für Begleitelemente nach Stahlgüten, nach Viertauer et al. 2024

Element	ULC-IF	DDQ	Drawing	Fine wire	Commercial	Structural	Rebar
Cu	0,030	0,040	0,060	0,070	0,100	0,120	0,400
Ni	0,030	0,040	0,060	0,070	0,080	0,100	0,350
Mo	0,008	0,010	0,015	0,015	0,015	0,040	0,080
Cr	0,030	0,040	0,060	0,080	0,080	0,100	0,150
Sn	0,008	0,015	0,015	0,015	0,020	0,030	0,080
Σ (Cu+Ni+Mo+Cr+Sn)	0,106	0,145	0,210	0,250	0,295	0,390	1,060

Ein Abgleich mit den Schrottklassen-Spezifikationen, siehe Kapitel 2.2, zeigt, dass selbst die kumulativen Grenzwerte für die Neuschrotte E2, E6 und E8 nicht hinreichend sind, um die nach (Arun et al., 2024) anzusetzenden Grenzwerte einzuhalten. Umso deutlicher gilt das für die Altschrott-Spezifikationen.

Konkrete Produktanforderungen seitens der Stahlanwender gibt es beispielsweise im Automobilsektor. Der Verband der Automobilindustrie (VDA) stellt mit dem Werkstoffblatt VDA 239-100 eigene Spezifikationen für unterschiedlichste Stahlgüten für den Automobilbau und somit auch mit Grenzwerte für den Gehalt an Fremdelementen bereit. Die VDA 239-100 ist jedoch

kostenpflichtig und nicht frei zugänglich. Einen Einblick in die VDA 239-100 für verschiedene kalt- und warmgewalzte Flachstähle liefert jedoch der Quality Guide der European Steel Business Group (*ESB Quality Guide V1.1 VDA239-100*, o. J.). Allerdings finden sich hier nur Angaben für den zulässigen Kupfergehalt, und diese sind recht unspezifisch: für alle aufgeführten Stahltypen (Weicher Stahl (CR1-5, HR0&2), mikrolegierten Stahl, IF) wird der Grenzwert mit „ $\leq 0,2\%$ “ angegeben. Die von (Arun et al., 2024) genannten Anforderungen sind demnach sowohl spezifischer als auch tendenziell strenger. Die deutschen OEMs verfügen wiederum über eigene Werksnormen, die auf der VDA 239-100 aufbauen; diese sind jedoch in hinreichend aktueller Fassung ebenfalls nicht frei verfügbar und konnten hier nicht geprüft werden. Es ist zu vermuten, dass die zwischen OEMs und Stahllieferant vereinbarten Grenzwerte auf Basis der OEM-Normen deutlich strenger sind, als beispielsweise die genannten „ $\leq 0,2\%$ “ für Kupfer in der VDA 239-100.

Die Effekte von Begleitelementen auf die Ver- und Bearbeitung der Stähle und deren Werkstoffeigenschaften sind gut belegt. Eine Zusammenfassung bietet beispielsweise (Rod et al., 2006). Laut (Bernhard et al., 2025) sind die negativen Effekte von Fremdelementen durch vielfältige Studien bereits in den 1990er Jahren belegt, erste Arbeiten stammen aus den 1960er Jahren.

Kupfer kann bei der Warmumformung des Stahls zu Warmbrüchigkeit (Risse in der Oberfläche des Walzguts) durch die Anreicherung von Kupfer an der Oberfläche führen, teilweise bereits ab Gehalten von 0,1 wt.-%. Nach (Rod et al., 2006) könnte jedoch eine deutlich höhere Toleranz, mindestens bis 0,8 wt.-%, bei einer Anpassung des Walzverfahrens erreicht werden, dies wird jedoch nicht näher ausgeführt. Auch beim Stranggießen von Stahl gehen hohe Kupfergehalte mit Rissen im Material einher. Nach (Bernhard et al., 2025) müssen hier, experimentell ermittelt, 0,2 wt.-% als oberes Limit für Kupfer bei einer Prozesstemperatur von 900°C angesehen werden. Dies deckt sich mit den oben genannten Mindestanforderungen der VDA 239-100. Sind neben Kupfer relevante Mengen an anderen Begleitelementen wie insbesondere Zinn vorhanden, kann dies nach (Rod et al., 2006) den Effekt der Warmbrüchigkeit noch verstärken; Nickel hingegen kann den Effekt wiederum vermindern, da es nach (Bernhard et al., 2025) die Löslichkeit von Kupfer und Zinn in der Stahlmatrix erhöht und somit eine Phasenseparation, die zur Warmbrüchigkeit führt, reduziert. Eine weitere Problematik ist die Korngrenzensegregation, die insbesondere durch Zinn verursacht werden kann; dabei kommt es im Temperaturbereich von 600 bis 950°C zu einer Verringerung der Warmduktilität, d.h. der plastischen Verformbarkeit, die für das Warmwalzen zentral ist.

Auch auf die Kaltumformbarkeit (Kaltwalzen) haben Restelemente negativen Einfluss, da sie vorallem zur Verhärtung der Stahlmatrix beitragen. Hier werden von (Rod et al., 2006) insbesondere Nickel, Molybdän, Chrom, Zinn und Arsen als nachteilig für die Tiefziehfähigkeit und Formbarkeit genannt. Als gegenteiligen Effekt, der für spezifische Anwendungen und Stahlgüten wiederum erwünscht ist, erhöhen viele Begleit- und Legierungselemente die Härtebarkeit der Stähle.

Die Tiefziehfähigkeit und Formbarkeit ist für zahlreiche Anwendungen beispielsweise im Automotive-Bereich zentral; aus den aufgeführten (und ggf. weiteren) negativen Auswirkungen der Begleitelemente ergeben sich die in Tabelle 10 genannten sehr strengen (indikativen) Grenzwerte für hochqualitative Stahlgüten.

Das HORIZON-Vorhaben ROAD-SiM (Recycling-oriented alloy design for next-generation of sustainable metallic materials), das 2022 bis 2024 durchgeführt wurde, hatte zum Ziel, zur Entwicklung von Recycling-orientierten Stahllegierungen beizutragen um die Circular Economy voranzubringen (CORDIS Datenbank, o. J.). Hierfür sollte auch analysiert werden, wie sich die Zusammensetzung des Stahls auch mit Bezug auf Fremdelemente auf die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe auswirken. Die zu entwickelnden Legierungen sollten bzgl. ihrer

Eigenschaften eine höhere Toleranz gegenüber Fremdelementen aufweisen, was die Nutzungsmöglichkeiten unterschiedlichen Schrottqualitäten ausweiten würde. Das Vorhaben setzt dabei auf hochlegierten Stählen auf. Es wurden allerdings „nur“ Antimon, Schwefel und Stickstoff als Verunreinigungen in einem spezifischen hochlegierten Stahl (X1CrNiMoN25-22-2) untersucht und festgestellt, dass Bruchzähigkeit und Zugfestigkeit nur in tolerablem Maße beeinträchtigt wurden. Hieraus lassen sich aber keine Schlüsse für die oben genannten und für niedriglegierte Qualitätsstähle entscheidenden Fremdelemente und deren Toleranz in diesen Stählen ziehen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass zentrale negative Effekte durch Fremdelemente hinreichend belegt sind. Bezüglich der Produkthanforderungen, ob die gesetzten Grenzwerte auf der Abnehmerseite letztlich auf wissenschaftlicher Evidenz basieren oder zusätzliche Sicherheitsmargen berücksichtigen, lässt sich keine finale Aussage treffen, da die OEM-individuellen Normen und deren Grundlagen nicht zugänglich sind. Die ermittelte Angabe bzgl. des Kupfer-Grenzwerts in der VDA 239-100 scheint nur ein Maximalwert zu sein, der durch die OEM-Normen für die jeweiligen Stahlgüten vermutlich noch spezifiziert wird.

7 Einordnung in den energie- und klimapolitischen Kontext

In dem Gespräch mit dem Vertreter der cleansort GmbH wurde klar, dass die Kunden des Unternehmens (Recycler / Metallhersteller) insbesondere auf bestehende oder erwartete EU-Regulierung beispielsweise bzgl. Recyclingquoten reagieren. Als Hemmnisse für einen verstärkten Einsatz sensorbasierter Sortiersysteme für ein hochwertigeres Metallrecycling bei den Kunden des Unternehmens wurden insbesondere schwankende Marktpreise für Schrott, regulatorische Unsicherheiten, sowie eine teilweise sehr langwierige Fördermittelvergabe genannt.

Hieraus wird die zentrale Rolle der politisch gestalteten Rahmenbedingungen deutlich. Im Folgenden werden zentrale politische Instrumente, die einen (möglichen) Einfluss auf die Verwendung von mehr Stahlschrott in der Primärstahlerzeugung haben, dargestellt und diskutiert.

Europäischer Emissionshandel und Stahlschrotteinsatz

Sachstand und Rezeption

Für die Frage, ob durch das ETS I zusätzliche Anreize – über die Bepreisung von Emissionen hinaus – für die Nutzung von Stahlschrott in der Stahlerzeugung, und insbesondere in der zukünftig auf der DR/EAF-Route basierenden Primärstahlerzeugung, gesetzt werden, sind die relevanten Produktbenchmarks zu betrachten, die die Basis für die freie Allokation von EUAs bilden. Entscheidend ist der Hot Metal Benchmark (HMB). Dieser wurde ursprünglich für die Zuteilung für die fossile integrierte Route (BF/BOF) geschaffen, umfasst nun nach dem aktuellen Guidance Document (*Guidance Document n°9 on the harmonised free allocation methodology for the EU ETS – 2024 revision, 2025*) aber auch die Produktion von Stahl über die DR/EAF Route.

Besonders am HMB und für die Fragestellung hier entscheidend ist, dass zwar die gesamte Stahlerzeugung inklusive aller Nebenanlagen und -prozesse bis hin zum Rohstahlgießen – d.h. alle Prozesse im Stahlwerk vor dem Walzen des Rohstahls – durch den HMB umfasst werden, seine Bezugsgröße jedoch das Roheisen (BF/BOF-Route) bzw. der Eisenschwamm / DRI (DR/EAF-Route) ist. Höhere Schrottanteile in der Stahlproduktion führen somit nicht zu einer höheren freien Allokation. Wäre dem so, könnte die freie Allokation dank des Schrotteinsatzes einen höheren Anteil der realen Emissionen abdecken und es entstünde ein wirtschaftlicher Vorteil in Relation zur Stahlproduktion mit niedrigem Schrottanteil. Dies wäre ein klarer Anreiz für eine stärkere Nutzung von Schrott in der Primärstahlerzeugung. Dieser ist aktuell nicht gegeben. Allerdings setzt das ETS mit der Bepreisung von Emissionen selbst Anreize zur Vermeidung von Emissionskosten; siehe Kapitel 5.

Die Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen (BDSV) fordert die Einführung eines „Schrottbonus“ in der Stahlherstellung, um stärkere Anreize den Schrotteinsatz zu setzen. Als präferierte Option wird dabei die Kopplung der freien Allokation mit Anforderungen an das Erreichen von Schrotteinsatzquoten genannt (Schrottbonus konkret - Sechs Handlungsempfehlungen für die Politik, o. J.).

Einordnung

Das ETS setzt über das gegenwärtige System der freien Allokation keine expliziten, zusätzlichen Anreize für einen Einsatz von Stahlschrott zur Substitution von Eisenerz in der Primärstahlroute. Dennoch werden durch den Einsatz von Stahlschrott natürlich emissionshandlungspflichtige Emissionen eingespart und die abzugebenden EUA sinken entsprechend, siehe Kapitel 5. Aus zwei Gründen erscheint eine zusätzliche Beanreizung des Schrotteinsatzes über die freie Allokation nicht

als zielführend. Zum einen stellt die freie Allokation im Emissionshandel das aktuelle Schutzregime vor Carbon Leakage dar, sie wurde nicht als Anreizinstrument konzipiert. Zum anderen befindet sich dieses CL-Schutzregime im Wandel: der CBAM Phase-In bis 2034 geht analog mit einem Phase-Out der freien Allokation einher¹⁷. Dementsprechend bietet sich die freie Allokation auch nicht als Ansatzpunkt für den vom BDSV geforderten „Schrottbonus“ an.

Grüne Leitmärkte /green-steel labelling, IAA und ESPR

Sachstand und Rezeption

Unter dem Begriff „grüne Leitmärkte“ werden verschiedene nachfrageseitige bzw. produktbezogene Instrumente diskutiert, um eine Differenzierung der Produktmärkte entlang der CO₂-Intensität der Produktion zu erreichen, die den Absatz klimafreundlich(er) produzierter Industrieprodukte beschleunigt. Zentral hierfür ist unter anderem die Schaffung von Transparenz für die Nachfrage durch eine klare Produktkennzeichnung mit Labeln.

Die Konzepte für ein green-steel labelling, die auf dem sogenannten sliding-scale approach aufbauen, werden von Vertretern der Recyclingbranche wie beispielsweise EuRIC deutlich kritisiert. Zentral für den sliding-scale Ansatz ist, dass die Emissionsgrenzwerte für die performance Kategorien mit steigendem Schrottteil an der Stahlproduktion anspruchsvoller werden. Dies gilt beispielsweise für den in Deutschland entwickelten LESS (low-emission steel standard) (LESS AISBL, o. J.), dem sich mittlerweile auch europäische Stahlunternehmen angeschlossen haben und der vom deutschen Bundeswirtschaftsministerium unterstützt wird. Die Systemgrenzen von LESS schließen die Produktion von Rohstahl sowie das Warmwalzen mit ein. Aus Sicht von EuRIC bzw. Recycling Europe (EuRIC, Recycling Europe AISBL, 2025) setzen sliding-scale Ansätze Fehlanreize, da erzwungenermaßen Produktion bei höheren spezifischen Emissionen in die gleiche Label-Kategorie eingeordnet wird wie solche, die hohe Stahlschrottteile nutzt. Dies würde die Nutzung von Stahlschrott unnötig begrenzen und stattdessen tendenziell den Einsatz primärer Eisenträger anreizen. Dieser Kritik schließen sich auch Stahlhersteller wie ORI Martin, die auf die EAF-Route mit hohen Schrottteilen setzen, sowie der ThinkTank epico, an (Martinsen, o. J.). Dieser Ansatz laufe auch dem Gedanken der Resilienz und Versorgungssicherheit entgegen, da Importe mit höheren Emissionen bei zeitgleichen Kostenvorteilen in Relation zur heimischen Produktion mit hohen Schrottteilen im Vorteil seien. Die genannten Kritiker des sliding scale-Ansatzes setzen beim Labelling auf die Ausweisung der realen produktspezifischen CO₂-Emissionen entlang des Lebenszyklusses (LCA).

Von den Befürwortern der sliding-scale wird der Ansatz mit Technologieoffenheit hinsichtlich der Produktionsroute begründet; LESS beispielsweise setze damit einen Anreiz für alle zukünftig klimaneutralen Produktionsrouten gleichermaßen. Darüber hinaus wären die vorhandenen Stahlschrottmengen begrenzt, weshalb für die Transformation der Primärstahlherstellung auch weiterhin erzbasierte Verfahren wie DRI/EAF erforderlich sind. Eine reine Beanreicherung des Schrotteinsatzes griffe daher zu kurz. (LESS AISBL, o. J.). Diese Begrenzung des Stahlschrottangebots wird von den Kritikern der sliding-scale bestritten.

Das Proposal der EU-Kommission für den Industrial Accelerator Act (Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a framework of measures for the acceleration of industrial capacity and decarbonisation in strategic sectors and amending Regulations (EU) 2018/1724, (EU) 2024/1735 and (EU) 2024/3110, 2026) sieht in Artikel 10 zur Förderung der Entwicklung von Leitmärkten die Einführung eines freiwilligen

¹⁷ Zukünftige mögliche Anpassungen z.B. im Rahmen der ETS-Reform 2026 mit gegebenenfalls verlängerter freier Allokation können hier noch nicht berücksichtigt werden

Klassifizierungssystems für Industrieprodukte, basierend auf den ETS-Produktbenchmarks (Annex I, 2003/87/EC), mittels delegated acts zum IAA vor. Dies gilt, sofern die Anforderungen an das betreffende Industrieprodukt bzgl. dessen Eigenschaft als „low-carbon“ nicht bereits von einem delegated act der neuen Ökodesign-Richtlinie (REGULATION (EU) 2024/1781 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC, o. J.) festgelegt wurden oder Teil des ESPR-Arbeitsplans sind. Analoges gilt, für Produkte die für die Bauwirtschaft relevant sind, mit Bezug auf die Construction Products Regulation CPR (REGULATION (EU) 2024/3110 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 November 2024 laying down harmonised rules for the marketing of construction products and repealing Regulation (EU) No 305/2011, o. J.).

Für Stahlprodukte abseits des Bausektors, d.h. im Wesentlichen der Bereich der Primärstahlproduktion, wird im Begründungsteil des IAA proposals auf die Festlegung der Anforderungen für „low-carbon steel“ durch einen delegated act der ESPR verwiesen. Der Steel and Metals Action Plan der EU-Kommission hält explizit fest, dass dieser delegated act auch Festlegungen zur Priorisierung von Produktdesign und Abfallaufbereitung (hier: Stahlschrott) treffen soll, die eine Separierung von Kupfer aus Stahlschrott forcieren (A European Steel and Metals Action Plan, 2025). Artikel 10 des IAA sieht explizit eine Klassifikation mit performance Kategorien vor.

In Erwägungsgrund 22 des IAA wird mit Verweis auf den Clean Industrial Deal der Stahlsektor explizit als Startpunkt für die Etablierung eines unionsweiten Labellingsystems zum Aufbau von Leitmärkten genannt. Konsistent hierzu wurde ein erster delegated act im Rahmen der ESPR, der Produkthanforderungen für Stahlprodukte definiert, im ESPR-Arbeitsplan noch für das Jahr 2026 angekündigt (Ecodesign for Sustainable Products and Energy Labelling Working Plan 2025-2030, 2025). Weiterhin verweist der Erwägungsgrund 22 explizit darauf, dass die nach performance classes differenzierten Anforderungen an Stahlprodukte die unterschiedlichen Dekarbonisierungsmöglichkeiten der verschiedenen Produktionsrouten berücksichtigen sollen, basierend auf dem Anteil an Stahlschrott an der jeweiligen Stahlproduktion für Primärstahl. Damit findet sich eine Verankerung des sliding-scale Ansatzes im IAA proposal, wenn auch nur in den Erwägungsgründen.

Einordnung

Der sliding-scale approach für die Produktklassifikation von Stählen im Kontext grüner Leitmärkte wird breit rezipiert und positiv aufgegriffen, aber auch kritisiert; er hat ein hohes Maß an Akzeptanz erreicht, nicht zuletzt durch den bereits als Zertifizierungssystem ausgestalteten freiwilligen Standard LESS, der durch das Bundeswirtschaftsministerium unterstützt wird. Mit dem IAA, wie aktuell von der EU-Kommission vorgeschlagen, würde der sliding-scale Ansatz für die Stahlproduktion auch regulatorisch verankert, auch wenn eine Umsetzung erst nachgelagert über einen delegated act im Rahmen der ESPR-Richtlinie erfolgen würde – allerdings ist dieser bereits für 2026 angekündigt. Die mögliche Ausgestaltung im Detail ist also aktuell noch recht offen.

Die Kritik an dem sliding-scale approach und speziell LESS sollte ernstgenommen und die Diskussion auf eine möglichst objektive Basis gestützt werden. Die Auseinandersetzung dreht sich um die Frage, ob unterschiedliche Technologien zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie gleichermaßen durch das nachfrageseitige Instrument bearbeitet werden sollten oder nicht. Zentral für die Argumentation ist die Frage, ob hinreichende nutzbare Schrottmengen zur Verfügung stehen, um die Primärstahlherstellung zu dekarbonisieren. Wenn das der Fall ist, gibt es keinen Grund den Einsatz von Schrott gegenüber dem Einsatz von Erz durch die sliding-scale zu

diskriminieren. Sollte die Schrottknappheit real sein, spricht dies dafür parallel zur Nutzung von Schrott auch die Erz-basierte Route über die Direktreduktion anzureizen, wozu die sliding-scale einen Beitrag leisten kann.

Wie in Kapitel 2.2 dargestellt, sind einerseits aktuell erhebliche Schrottmengen vorhanden, die bei entsprechender Aufbereitung in die EU-Primärstahlproduktion umgeleitet werden könnten. Aktuell stehen ca. 20 Mio. t überschüssiger Stahl-Altschrott zur Verfügung, die derzeit überwiegend exportiert werden. Bis 2050 wird ein Anwachsen auf 43 Mio. t prognostiziert. Auf den ersten Blick spricht dies dafür, dass ganz erhebliche Mengen vorhanden sind, die (mit Ausnahme der zusätzlichen Aufbereitungstechnik, wie beispielweise in Kapitel 4.3.1 dargestellt) auch genutzt werden könnten, ohne das hierfür zusätzliche Produktionsinfrastruktur wie im Falle der Direktreduktion aufgebaut werden müsste. Die Frage, ob die Schrottmengen ausreichen um die europäische Stahlproduktion zu dekarbonisieren, muss dennoch klar verneint werden. Die Stahlproduktion der EU beträgt derzeit ca. 130 Mio. t pro Jahr, siehe Kapitel 2.2. Es ist offensichtlich, dass die vorhandenen Stahlschrottmengen nicht ausreichen, um diese Produktionsmenge zu bedienen. Dies wäre nur dann theoretisch denkbar, wenn andere Stahlschrottströme in ganz erheblichem Umfang zusätzlich in die Primärstahlproduktion umgeleitet würden: aus der derzeitigen Sekundärstahlproduktion oder aus Importen. In beiden Fällen stellt sich dann die Frage nach den möglichen wirtschaftlichen und ökologischen Effekten der nachgelagert erforderlichen Substitution des Schrotteinsatzes bei den bisherigen Stahlschrottnutzern. Dies gilt auch für das Zurückfahren der derzeit hohen Schrottexpote, siehe unten. Wie weit die verfügbaren überschüssigen Schrottmengen reichen um die derzeitige Primärproduktion anteilig zu substituieren, ist aber auch abhängig davon welche Produktionsmengen zukünftig im Binnenmarkt gehalten werden können. Auch die Frage, wie die Wertschöpfungskette der Stahlerzeugung sich zukünftig geografisch sortiert (oder durch Industriepolitik sortiert wird), insbesondere ob die Direktreduktion weitgehend in der EU stattfindet oder in erheblichem Maße HBI importiert wird, spielt hier eine Rolle und ist noch offen. Vor diesem Hintergrund ist es stringent, dass sich die Kritiker des sliding-scale Ansatzes für eine Stärkung von HBI-Importen aussprechen (Martinsen, o. J.).

Zwar ließe sich argumentieren, dass zumindest kurz- bis mittelfristig keine Diskriminierung des Schrotteinsatzes, bzw. unter anderem Blickwinkel formuliert eine parallele nachfrageseitige Beanreizung der DR/EAF-Route, erforderlich sei, da die aktuell vorhandenen ca. 20 Mio. t Schrott eine sehr schnelle Dekarbonisierung ermöglichen würden. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass Planungssicherheit und entsprechende Anreize frühzeitig vorhanden sein müssen, bevor Investitionsentscheidungen getroffen und Vorhaben tatsächlich umgesetzt werden. Es ist zudem nicht absehbar, dass auf eine heimische DR/EAF-Produktion vollständig verzichtet werden kann oder sollte: eine vollständige Abhängigkeit von HBI-Importen außerhalb der EU erscheint nicht als wünschenswertes Szenario und stünde gegebenenfalls den Zielen z.B. des NZIA entgegen. Teilweise wurden finale Investitionsentscheidungen, auch gestützt durch erhebliche staatliche Fördermittel, in eine integrierte DR/EAF-Primärstahlproduktion auch schon getroffen. Für diese frontrunner-Vorhaben könnte der sliding-scale approach eine wichtige Unterstützung für die Marktetablierung sein.

Regulatorische Anforderungen an den Einsatz von recyceltem Stahl für Primärstahlgütern - ELVR

Sachstand und Rezeption

Derzeit gibt es keine regulatorischen Bestimmungen, die einen Einsatz von recyceltem Stahl (und damit indirekt von Stahlschrotten in der Stahlherstellung) für Anwendungen von Primärstahlgütern vorschreiben. Im Rahmen der geplanten End-of-Life Vehicles Regulation (ELVR) könnte dies möglich werden. Für die ELVR wurde Ende 2025 / Anfang 2026 eine politische Einigung erzielt, zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Studie stand die formale Beschlussfassung allerdings noch aus (Europäischer Rat, Rat der Europäischen Union, 2025; Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on circularity requirements for vehicle design and on management of end-of-life vehicles, amending Regulations (EU) 2018/858 and 2019/1020 and repealing Directives 2000/53/EC and 2005/64/EC, o. J.). Die ELRV adressiert sowohl die bessere Rezyklierfähigkeit von Automobilen als auch Anforderungen an den Rezyklateinsatz für neue Fahrzeuge. Explizite Vorgaben bzgl. des Rezyklateinsatzes werden durch den Richtlinienentwurf jedoch nur für Kunststoffe festgelegt, und diese treten erst mit einer Verzögerung von sechs bzw. zehn Jahren in Kraft. Die Kommission soll aber („shall“), auf Basis eines impact assessment weitere konkrete Anforderungen für den Rezyklateinsatz durch delegated acts festlegen. Dies gilt auch explizit für die Nutzung von recyceltem Stahl (Art. 6 (6) des ELVR-Entwurfs) unter Berücksichtigung verschiedener Restriktionen (Schrottverfügbarkeit, Schrottqualität, etc.), wobei die Machbarkeit innerhalb eines Jahres nach Inkrafttreten der ELRV untersucht werden und der delegated act zwei Jahre nach Inkrafttreten der ELVR vorliegen soll. Die Anforderungen an den Rezyklateinsatz sind dabei explizit durch post-consumer Material, im Falle von Stahl also durch den Einsatz von Altstahlschrott, zu erfüllen. Durch das ebenfalls vorgesehene Exportverbot für nicht mehr fahrfähige Fahrzeuge verbleibt perspektivisch mehr nutzbarer eol-Schrott in der EU.

ThinkTanks / NGOs haben sich im Vorfeld der politischen Einigung für eine direkte Einführung von Quoten für den Einsatz von recyceltem Stahl in neuen Fahrzeugen durch die ELRV stark gemacht. So argumentiert beispielsweise T&E, auf Basis einer Studie des Öko-Instituts, dass solche Quoten technisch und wirtschaftlich machbar und vorteilhaft wären (Sutter et al., 2025; Transport & Environment (T&E), 2025). Ein breites Bündnis aus Interessenverbänden der Recyclingwirtschaft (EuRIC) sowie von ThinkTanks / NGOs forderte ebenfalls im Vorfeld der politischen Einigung Quoten für den Einsatz von recyceltem Stahl in Fahrzeugen, konkret von 30% bis 2030 und von 40% bis 2035, ebenfalls mit Verweis auf die genannte Studie des Öko-Instituts (*Environmental organisations, think tanks and recycling industry call for measures to boost the use of recycled steel in the automotive sector*, 2025).

Der VDA begrüßte die politische Einigung zur ELVR, allerdings mit Einschränkungen. Unter anderem wird ein „Automatismus“ alle Materialströme mit Rezyklateinsatzquoten zu belegen – hiermit sind wohl die in der ELVR angesprochenen delegated acts nach Art. 50 und Art. 6 ELVR-Entwurf angesprochen - , abgelehnt (VDA-Präsidentin Hildegard Müller zur *End-of-Life-Verordnung*, o. J.). Dies spricht für eine eher zurückhaltende, evtl. letztlich auch ablehnende Positionierung des VDA bzgl. konkreter Einsatzquoten für Recyclingstahl.

Einordnung

Die Produktion von Fahrzeugen frägt enorme Stahlmengen nach, Quoten für den Einsatz von recyceltem Stahl könnten einen enormen Hebel darstellen, um die Nachfrage nach diesem zu sichern und damit auch Anreize für eine verstärkte Sortierung bei den Recyclern zu schaffen. Ob und wann eine entsprechende Regulierung im Zuge der zukünftigen ELVR eingeführt wird und wie zügig eventuelle Quoten dann eingephasst werden, ist derzeit völlig offen. Möglicherweise könnten

solche Quoten auch starke Überschneidungen mit der Wirkung eines degelated acts im Rahmen der ESPR (siehe oben) aufweisen.

Handelspolitische Maßnahmen / Exportrestriktionen

Sachstand und Rezeption

Aktuell gibt es keine expliziten Exportrestriktionen für Stahlschrott; diese werden jedoch intensiv diskutiert. Im „Steel and Metals Action Plan“ der EU-Kommission (A European Steel and Metals Action Plan, 2025) werden mögliche Maßnahmen angekündigt, um einen fairen globalen Markt und Handel mit Metallschrotten zu ermöglichen. Die KOM erwähnt in diesem Zusammenhang Handelsrestriktion von Drittstaaten bzgl. des Exports in die EU sowie unfaire Subventionen für das heimische Recycling in Drittstaaten, die (auch) dazu beitragen, dass dortige Unternehmen höhere Preise für Schrott zahlen könnten als EU-Unternehmen. Die KOM kündigt an, die Situation zu monitoren und, sofern erforderlich, im dritten Quartal 2025 eine handelspolitische Maßnahme vorzuschlagen, die eine hinreichende Versorgung mit Schrott in der EU sicherstellt. Hinsichtlich der bestehenden Exportrestriktionen von Drittstaaten gegenüber der EU würden reziproke Maßnahmen – d.h. Exportrestriktionen der EU für Schrotte gegenüber diesen Staaten – geprüft. Die Kommission hat ein entsprechendes Zollüberwachungssystem für Importe und Exporte von Metallschrotten mittlerweile in Kraft gesetzt (*Commission introduces surveillance of imports and exports of metal scrap*, o. J.). Der angekündigte Maßnahmenvorschlag, bzw. die Beantwortung der Frage ob mit einem solchen zu rechnen ist, steht zumindest für Stahlschrott aktuell aber noch aus.

Eine bereits bestehende Beschränkung bzw. Konditionalisierung des Exports von Stahlschrotten ergibt sich jedoch aus dem Abfallrecht, konkret aus der EU-Abfallverbringungsverordnung (Waste Shipment Regulation - WSR) (REGULATION (EU) 2024/1157 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 April 2024 on shipments of waste, amending Regulations (EU) No 1257/2013 and (EU) 2020/1056 and repealing Regulation (EC) No 1013/2006, o. J.). Die novellierte WSR ist seit 20. Mai 2024 in Kraft, die dort enthaltenen Exportregeln werden überwiegend drei Jahre später ab dem 21. Mai 2027 angewendet. Die Exportregeln unterscheiden dabei insbesondere nach dem Export in OECD- und Nicht-OECD Staaten. Der Export in OECD-Staaten ist demnach grundsätzlich erlaubt, unter einschränkenden Bedingungen (Genehmigungspflichten, Dokumentations- und Nachweispflichten, umweltgerechte Verwertung im Importland). Die Bedingungen, unter denen ein Export in Nicht-OECD-Staaten möglich ist, werden mit der beschlossenen WSR-Novelle deutlich verschärft: So müssen Nicht-OECD-Staaten aktiv beantragen, zukünftig weiterhin Abfälle importieren zu dürfen. Diese Staaten müssen dann nachweisen, dass sie die Abfälle umweltgerecht entsprechend den Festlegungen der WSR verarbeiten. Antragschluss hierfür war bereit am 21.02.2025. Diese Regularien gelten auch für „nicht gefährliche Abfälle“, worunter Stahlschrott in der Regel fällt. (Europäische Kommission, o. J.-b). Mit Indien hat ein entscheidendes Nicht-OECD-Land für den Stahlschrottexport der EU einen entsprechenden Antrag gestellt, darüber hinaus viele weitere. Die Türkei als wichtigstes Importland für EU-Stahlschrott ist OECD-Mitglied. Daher ist zu vermuten, dass sich die realen Beschränkungen für den Stahlschrottexport in Grenzen halten und im Wesentlichen eine Kostenthematik darstellen, nicht jedoch eine Exportrestriktion im engeren Sinne.

Mögliche Exportrestriktionen der EU für Stahlschrott sind sehr umstritten, je nach Interessenlage in der Wertschöpfungskette. Während Stahlunternehmen sich für Exportrestriktionen aussprechen, um einen höheren Zugriff auf heimische Eisenträger und damit Flexibilität und zusätzliche Optionen zur Emissionsreduktion zu gewinnen (Martinsen, o. J.), sehen Vertreter der Recyclingwirtschaft potenzielle Exportrestriktionen als Marktbeschränkung (Latchem, 2025). Auch potenziell unerwünschte Sekundäreffekte mit Blick auf Emissionseinsparungen in den Importländern werden

von letzteren als Argument angeführt. Ein zentraler Aspekt in der Debatte sind die höheren Preise, die sich für Stahlschrott in Drittstaaten gegenüber dem EU-Markt erzielen lassen (A European Steel and Metals Action Plan, 2025; Martinsen, o. J.). Die Recyclingwirtschaft sieht die mangelnde Nachfrage nach Stahlschrott in der EU als zentralen Grund für Überschussmengen, die dann legitimerweise in den Export gingen; zunächst müssten Anreize für eine höhere Schrottnachfrage im Binnenmarkt geschaffen werden, bevor über Exportrestriktionen gesprochen werde (Jones, 2025).

Einordnung

Exportrestriktionen werden, wie geschildert, sehr kontrovers diskutiert. Einerseits ist derzeit tatsächlich, sieht man auf die erheblichen Überschussmengen an Stahlschrott in der EU, kein Stahlschrottmangel zu erkennen; dies spricht nicht für die Einführung von Exportrestriktionen. Andererseits, wie in dieser Studie dargestellt, ist Stahlschrott nicht gleich Stahlschrott. Die Verwendungsmöglichkeiten sind entscheidend; gegenwärtig sind diese für Primärstahlhersteller begrenzt. Durch bessere Sortierung, wie in Kapitel 4.3.1 dargestellt, könnte sich diese Situation mittelfristig jedoch umkehren und die überschüssigen Altschrotte werden zu einem begehrten Rohmaterial. Die Nachfrage nach den vorhandenen Altschrotten im Binnenmarkt würde dann steigen; dies wird ggf. von den Befürwortern von Exportrestriktionen bereits antizipiert. Dann stellt sich auch die Frage nach möglichen Subventionen der Stahlerzeugung in den derzeitigen Importländern umso mehr: zwar ist es sehr wahrscheinlich, dass bei der derzeit in der EU gezahlten Altschrottpreisen dauerhaft ein wirtschaftlicher Anreiz besteht, aufbereiteten Altschrott statt DRI/HBI als Eisenträger einzusetzen, siehe Kapitel 5. Ob dies unter Berücksichtigung der in den derzeitigen Importländern gezahlten, höheren Preisen auch noch hinreichend der Fall ist, ist unklar.

Fazit: Aufbereitung von Altschrott im Policy-Kontext

Die verstärkte Aufbereitung von Stahlschrott ist, im Kontext des vorstehend diskutierten bestehenden bzw. sich entwickelnden Policy-Rahmens, grundsätzlich als no-regret Option einzuschätzen. Durch die Aufbereitung entsteht ökonomischer Mehrwert, potenziell sowohl für Recycler als auch für Primärstahlhersteller. Die handelspolitischen Problematiken und Interessenskonflikte könnten jedoch akuter werden. Entwickelt sich ein Markt mit standardisierten Qualitäten aufbereiteten Schrotts für den Einsatz als Eisenträger in der Primärstahlerzeugung, kann dies für die Definition von Produktanforderungen an grünen oder low-carbon Stahl im Rahmen von nachfrageseitigen Instrumenten (ESPR-Anforderungen, Label, Quoten) berücksichtigt werden.

Explizite ökonomische Anreize für eine stärkere Aufbereitung oder Nutzung von Altschrotten, die über eine Vermeidung von Emissionskosten hinausgehen, sind derzeit nicht oder zumindest nicht als explizite Zielsetzung zu erkennen. Von dem erwarteten delegated act im Rahmen der ESPR könnte ein regulatorischer Impuls für die stärkere Nutzung von Schrott ausgehen. Ob und wann über die ELVR regulatorische Impulse für eine optimierte Altschrottaufbereitung und -nutzung für Qualitätsstahlgüten ausgehen wird, ist derzeit unklar.

8 Handlungsansätze und weitere Forschungsfragen

Aus der Analyse wurden die folgenden Handlungsansätze, sowohl für eine Stärkung der Aufbereitung von Altschrott wie auch einer Nutzung von recyceltem Stahl in typischen Qualitätsstahlanwendungen, sowie Fragestellungen bzw. Themen für weitere Forschungsarbeiten abgeleitet.

Handlungsansätze

1. Regulierungsansätze (ELVR) für verpflichtenden Stahlschrott-Einsatz konsequent nutzen

Die ELVR bietet einen Ansatzpunkt, Anforderungen an den Einsatz von recyceltem Stahl in dem Primärstahl-dominierten Bereich der Fahrzeugproduktion zu formulieren, die einen deutlichen Nachfrageimpuls nach aufbereitetem Altschrott für die Qualitätsstahlproduktion setzen können. Durch eine verbindliche, ambitionierte aber technisch realisierbare Quotenregelung, die schrittweise eingeführt wird, könnte so der Markt für die Aufbereitung von Altschrotten deutlich gestärkt werden.

2. Digitale Produktpässe (ESPR) so ausgestalten, dass Upcycling möglich wird

Die Nachvollziehbarkeit der elementaren Zusammensetzung von Stählen und Stahlschrotten ist entscheidend für die circular economy, das Upcycling vorhandener Altschrottmengen, und ein Vermeiden von Downcycling in diesem Bereich.

Digitale Produktpässe (DPP) sind entscheidend für die Einführung und Operationalisierung nachfrageseitiger Instrumente entlang der Wertschöpfungskette (z.B. Nachhaltigkeitskriterien in der öffentlichen Vergabe, green labeling, ELVR-Quoten). Sie sollten so ausgestaltet werden, dass die Elementzusammensetzung von Stählen und Schrotten miterfasst wird: dies würde eine möglichst sortenreine Getrennterfassung und -haltung im Rücklauf in die Stahlherstellung ermöglichen.

3. Standardisierung aufbereiteten Altschrotts vorantreiben

Derzeit gibt es keine Produktstandards, die aufbereiteten Altschrott als Einsatzmaterial für Qualitätsstähle spezifizieren. Es fehlt ein standardisiertes, zertifizierungsfähiges Produkt das am Markt gehandelt werden könnte. Eine entsprechende Standardisierung, ggf. auch Normierung, würde zur Investitions- und Planungssicherheit der Marktteilnehmer beitragen, sowohl für die Recyclingwirtschaft, die planbar in neue Aufbereitungsanlagen investieren könnte, als auch für die Stahlunternehmen, die ihre Eisenträgernachfrage auf ein verlässlicheres Angebot standardisierter Schrott-Produkte hin ausrichten könnte.

Aufbauend auf einer solchen Standardisierung könnten für die aufbereiteten Stahlschrotte auch eine Verknüpfung mit den genannten DPP für Stahl erfolgen.

4. „Schrott-Boni“ im Förderinstrumentarium prüfen

Die Förderinstrumente für die Dekarbonisierung der Industrie sollten dahingehend geprüft werden, ob sie sinnvolle Anreize für ein Upcycling für Altstahlschrott, d.h. die in dieser Studie thematisierte Aufbereitung, bieten, und diese ggf. steigern. So ist z.B. das Förderprogramm Klimaschutzverträge

/ CO₂-Differenzverträge durch die Definition der konventionellen Referenz für die Bestimmung der geförderten Emissionsminderung über die ETS I - Produktbenchmarks nicht darauf ausgelegt, den Einsatz von Stahlschrott zu fördern. Es sollte geprüft werden, ob zusätzliche „Schrott-Boni“ eingeführt werden können.

5. Design for Recycling Ansätze regulatorisch stärken (ELVR)

Durch eine Vordemontage zu verschrottender Konsum- und Investitionsgüter vor dem Schreddern könnten insbesondere die Kupferanteile in dem zu verschrottenden Gemenge deutlich gesenkt werden. Nach der Studie (Sutter et al., 2025) könnte beispielsweise bei Automobilen der typische Kupfergehalt des Schrotts durch eine Vordemontage der Kabelbäume von 0,4 wt.-% auf 0,1 wt.-% reduziert werden. Die ELVR in der politisch geeinten Fassung sieht zwar bereits eine allgemeine Pflicht für die Hersteller zur Ermöglichung einer leichteren Demontierbarkeit vor, weitere Spezifikationen für diese Anforderung fehlen jedoch. Diese könnten im Rahmen von ELVR delegated acts eingeführt werden – dies wird im Steel and Metals Action Plan der EU-Kommission auch explizit gefordert.

Weitere / anschließende Forschungsthemen und -fragen

1. Analyse globaler Handelsstrom- und Substitutionseffekte bei steigender EU (/OECD)-Altschrottnutzung

Es ist unklar, zu welchen Substitutionseffekten eine deutlich erhöhte EU-interne Nutzung von Altstahlschrott bei den bisherigen Hauptimportländern führen könnte; insbesondere die Türkei hat in ihrer Produktionsstruktur ein hohes Maß an Abhängigkeit von den EU-Exporten. Könnte die Türkei auf andere Schrottimporte zurückgreifen? Oder würde das Land verstärkt Stahl direkt importieren, oder eine eigene Primärproduktion aufbauen – und wäre diese Primärproduktion klimafreundlich?

Wie verändern sich globale Schrotthandelsströme, in Abhängigkeit von ggf. regional differenzierten Zahlungsbereitschaften für Schrotte durch international variierende Anreizsysteme und Regulierung, auch durch (potenzielle) Handelsrestriktionen? Eine Analyse dieser Fragestellungen könnte von verschiedenen Szenarien für die Entwicklung der EU-intern genutzten Schrottmengen ausgehen. Darüber hinaus könnte die Fragestellung auf alle relevanten derzeitigen Schrottexporteure ausgeweitet werden (im Wesentlichen die OECD-Staaten).

2. Analyse der CAPEX-Amortisation in Abhängigkeit der zu erzielenden Sortierqualität

Die vorliegende Studie konnte für die techno-ökonomische Analyse, siehe Kapitel 5, die zusätzlichen CAPEX für die Sensorsysteme nicht berücksichtigen, da keine öffentlich verfügbaren Daten hierzu vorlagen.

Neben den zusätzlichen Sensorsystemen ist aber auch die mechanische Aufbereitung des Sortierguts – Liberation z.B. durch intensivierte Schreddern – relevant für das Sortierergebnis. Grundsätzlich lässt sich festhalten: je höher der Aufwand beim Sortiersystem, sowie mechanisch als auch für die Elementensensorik – desto qualitativ hochwertiger das Sortiergut. Die CAPEX werden also von der geforderten Qualität / den Spezifikationen des Sortierguts abhängen. Andererseits wird die Zahlungsbereitschaft für qualitativ hochwertiges Sortiergut auch tendenziell höher sein. Entscheidend für die CAPEX-Amortisation ist der zu erwartende Durchsatz, der wiederum auch von der zu erzielenden Qualität des Sortierguts abhängt.

Eine Detailuntersuchung, ausgehend von den spezifischen Prozesskomponenten, die für ein bestimmtes Sortierergebnis erforderlich sind, könnte hier mehr Klarheit schaffen.

3. Empirische Grundlagen schaffen bzgl. möglichen Spielräumen bei Grenzwerten für Begleitelemente in OEM-Normen / Produktspezifikationen

Wie in Kapitel 6 ausgeführt, sind die OEM-Normen der Automobilhersteller bzgl. geforderter Begleitelement-Gehalte in Stählen, aufbauend auf der VDA 239-100, nicht frei zugänglich und konnten nicht geprüft werden. Die in der wissenschaftlichen Community genutzten /zitierten „Grenzwerte“ für Begleitelemente, bezogen auf unterschiedliche Qualitätsstufen von Stählen, scheinen seit Jahrzehnten tradiert zu werden, ohne dass deren empirische Basis ganz klar zu sein scheint. Sind die tradierten Grenzwerte durch Empirik aus Werkstofftechnik und Verarbeitungspraxis gedeckt, oder enthalten sie Sicherheitsmargen, die Spielraum für Anpassungen ermöglichen? Möglicherweise gibt es hier noch Erkenntnislücken, die durch verfahrenstechnische Untersuchungen geschlossen werden könnten. Oder gibt es Ansätze für ein Legierungsdesign, dass z.B. größere Mengen Kupfer toleriert bzgl. der resultierenden Werkstoffeigenschaften? Hierzu gibt es bereits – wenige – laufende Forschungsvorhaben (siehe Kapitel 4.3.1) , zu denen allerdings nur wenige Informationen zur Verfügung stehen.

4. Vollständige LCA-Vergleichsanalyse der schrottbasierten vs. DRI-basierten EAF-Stahlerzeugung

Die in dieser Studie vorliegende techno-ökonomische Analyse vergleicht spezifische Produktionskosten unter Berücksichtigung der monetarisierten emissionshandelspflichtigen Emissionen. Sie bilanziert allerdings nicht die vollständigen Lebenszyklusemissionen – inklusive z.B. der einer zusätzlichen Aufbereitung des Altschrotts zuzuordnenden Scope 1,2,3 – Emissionen. Durch den Schrotteinsatz verursachte Emissionen werden oftmals vereinfachend mit Null angesetzt. Die vorgelagerten Emissionen durch die Schrotterfassung, die Aufbereitung im Recyclingbetrieb sowie die verschiedenen Transportprozesse werden nicht berücksichtigt. Für die Scope 1 – Emissionen erscheint der vereinfachende Ansatz von Nullemissionen hinreichend plausibel. Für die Scope 2 und 3 Emissionen – optimalerweise differenziert nach Schrottherkunft – lässt sich dies nicht ohne weiteres sagen, und sollte für einen möglichst realitätsnahen Vergleich der verschiedenen Produktionsrouten hinsichtlich ihrer Klimawirkung berücksichtigt werden.

9 Anhang: Inputdaten für die techno-ökonomische Analyse und detaillierte Ergebnisse

Inputdaten

Tabelle 11: Parametrisierung für die Annuisierung

<i>Parametrisierung für die Annuisierung</i>	
WACC [%]	7,5
Lebensdauer [a]	15
Produktionskapazität [MT/a]	1
Produktionsmenge [MT/a]	1

Tabelle 12: Angenommene CAPEX für die modellierten Produktionsrouten

<i>CAPEX [€/t_Kapazität]</i>		Quellen
DRI100_Scrap0	621	(Wörtler et al., 2013) auf 2024 inflationiert
DRI0_Scrap100	276	(Wörtler et al., 2013) auf 2024 inflationiert
DRI80_Scrap20	552	(Wörtler et al., 2013) auf 2024 inflationiert
DRI50_Scrap50	448,5	(Wörtler et al., 2013) auf 2024 inflationiert
DRI20_Scrap80	345	(Wörtler et al., 2013) auf 2024 inflationiert
BF/BOF_Reference	255	(Wörtler et al., 2013) auf 2024 inflationiert

BF/BOF_Reference: CAPEX angenommen für brownfield-relining

Tabelle 13: Angenommene Energieträger- und Feedstock-Preise

<i>OPEX-Preise</i>							
<i>Komponente</i>	<i>Einheit</i>	<i>2025</i>	<i>2030</i>	<i>2035</i>	<i>2040</i>	<i>2045</i>	<i>Quellen</i>
Kokskohle	€/t	240	240	240	240	240	(Jahresbericht 2023, 2023)
DRI-Pellets	€/t	154	154	154	154	154	(Agora Industrie, 2022)
Strom	€/MWh	98,8	74,6	73,5	74,9	74,9	(Energy-Charts Strom-Futures (Base), 2026; Entwicklung der Industriestrompreise (SMARD), 2025)
Wasserstoff	€/kg	6,12	4,53	4,13	3,2	3,03	(Mendelevitch et al., 2024)
Eisenerz	€/t	90,16	88,78	87,95	87,4	87,4	(Cecil, 2025; Zadeh, 2025), Interpolation
Erdgas	€/MWh	48,0	22,8	22,2	20,9	19,9	(Mendelevitch et al., 2024)
Stahlschrott - Altschrott -	€/t	272,2	260,3	260,3	260,3	260,3	(BDSV, o. J.), langjähriger Mittelwert
Biomasse	€/t	386	345,6	321,36	264,8	224,4	(Yaduvanshi, 2025), eigene Annahmen

Tabelle 14: Angenommener CO2-Preis

CO2-Preis						Quellen
	2025	2030	2035	2040	2045	
CO2-Preis [€/t]	73,90	118,40	162,90	207,40	251,90	(Auctioning (EU ETS 1): German Auctioning of Emission Allowances Fourth Quarter 2025, 2026); Experten-schätzung

Tabelle 15: Technische Inputdaten

Technische Inputs							
Type	Component	DRI100_Scrap0	DRI50_Scrap50	DRI0_Scrap100	BF/BOF_reference	Unit	Quellen
Emissions	CO2	0,05	0,05	0,05	1,71	t/t RS	(Agora Industrie, 2022; Vogl et al., 2018)
Energy demand	Natural Gas	0	0	0	0,17	MWh/t RS	(Agora Industrie, 2022)
Energy demand	Electricity	0,68	0,565	0,45	0	MWh/t RS	(Agora Industrie, 2022; Cavaliere, 2019)
Energy demand	Hydrogen	80,5	41,75	3	0	kg/t RS	(Agora Industrie, 2022)
Energy demand	Coking Coal	0	0	0	0,4	t/t RS	(Agora Industrie, 2022)
Energy demand	Biomass	0,015	0,015	0,015	0	t/t RS	Eigene Annahme, entspricht C-Zusatz von 10kg/t im EAF
Feedstock Demand	Iron Ore	0	0	0	1,39	t/t RS	(Agora Industrie, 2022)
Feedstock Demand	Scrap Steel	0	0,545	1,09	0,19	t/t RS	(BDSV - Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V., o. J.; Lösch, 2022)
Feedstock Demand	DRI-Pellets	1,61	0,805	0	0	t/t RS	(Cavaliere, 2019; Lösch, 2022)
OPEX	Additional OPEX	71,3	71,3	71,3	57,8	€/t RS	(Agora Industrie, 2022; Fishedick et al., 2014) ,auf 2024 inflationiert

Tabelle 16: Berechnete freie EUA-Allokation für die Produktionsrouten

Freie Allokation. Eigene Berechnungen auf Basis ETS-Produktbenchmarks und CBAM-Phase-In.					
[EUA/t_RS]	2025	2030	2035	2040	2045
BF_BOF_reference	1,35	0,73	0	0	0
Scrap0_DRI100	1,34	0,68	0	0	0
Scrap20_DRI80	1,07	0,54	0	0	0
Scrap50_DRI50	0,67	0,34	0	0	0
Scrap80_DRI20	0,27	0,14	0	0	0
Scrap100_DRI0	0,22	0,11	0	0	0

Detaillierte Ergebnisse der techno-ökonomischen Analyse

Die folgende Tabelle erhält die Modellierungsergebnisse der techno-ökonomischen Analyse, d.h. die berechneten Produktionskosten pro Tonne Rohstahl und deren Komponenten für die untersuchten Produktionsszenarien.

Tabelle 17: Detaillierte Modellierungsergebnisse der techno-ökonomischen Analyse

Project name	Period	CAPEX annuity	Additional OPEX	Biomass	Coking Coal	DRI-Pellets	Electricity	Hydrogen	Injection Coal	Iron Ore	Natural Gas	Scrap Steel	CO2 Cost	Summe
Scrap0_DRI100	2025	60,92	71,30	5,79	0	247,94	67,18	492,66	0	0	0	0	-95,22	850,57
Scrap0_DRI100	2030	60,92	71,30	5,18	0	247,94	50,73	364,67	0	0	0	0	-74,49	726,25
Scrap0_DRI100	2035	60,92	71,30	4,58	0	247,94	50,93	311,54	0	0	0	0	8,15	755,35
Scrap0_DRI100	2040	60,92	71,30	3,97	0	247,94	50,93	257,60	0	0	0	0	10,37	703,03
Scrap0_DRI100	2045	60,92	71,30	3,37	0	247,94	50,93	243,92	0	0	0	0	12,60	690,96
Scrap50_DRI50	2025	43,99	71,30	5,79	0	123,97	55,82	255,82	0	0	0	148,35	-45,77	659,28
Scrap50_DRI50	2030	43,99	71,30	5,18	0	123,97	42,15	189,35	0	0	0	141,86	-34,28	583,54
Scrap50_DRI50	2035	43,99	71,30	4,58	0	123,97	42,32	161,77	0	0	0	141,86	8,15	597,94
Scrap50_DRI50	2040	43,99	71,30	3,97	0	123,97	42,32	133,76	0	0	0	141,86	10,37	571,55
Scrap50_DRI50	2045	43,99	71,30	3,37	0	123,97	42,32	126,65	0	0	0	141,86	12,60	566,06
Scrap100_DRIO	2025	27,07	71,30	5,79	0	0,00	44,46	18,36	0	0	0	296,70	-12,19	451,49
Scrap100_DRIO	2030	27,07	71,30	5,18	0	0,00	33,57	13,59	0	0	0	283,73	-7,00	427,45
Scrap100_DRIO	2035	27,07	71,30	4,58	0	0,00	33,71	11,61	0	0	0	283,73	8,15	440,14
Scrap100_DRIO	2040	27,07	71,30	3,97	0	0,00	33,71	9,60	0	0	0	283,73	10,37	439,75
Scrap100_DRIO	2045	27,07	71,30	3,37	0	0,00	33,71	9,09	0	0	0	283,73	12,60	440,86
Referenz	2025	25,01	57,80	0,00	96	0,00	0,00	0,00	40,8	125,32	8,16	51,72	26,69	431,51
Referenz	2030	25,01	57,80	0,00	96	0,00	0,00	0,00	40,8	123,40	3,88	49,46	116,53	512,88
Referenz	2035	25,01	57,80	0,00	96	0,00	0,00	0,00	40,8	121,49	3,72	49,46	278,56	672,84
Referenz	2040	25,01	57,80	0,00	96	0,00	0,00	0,00	40,8	121,49	3,55	49,46	354,65	748,76
Referenz	2045	25,01	57,80	0,00	96	0,00	0,00	0,00	40,8	121,49	3,38	49,46	430,75	824,69

10 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Entwicklung des EU Stahlschrott Außenhandels	11
Abbildung 2: Altschrott-Lagerverkaufspreise in Deutschland, Sorten E1 und E3, 2015 - 2025	14
Abbildung 3: Interventionspunkte für eine Steigerung des Altschrotteinsatzes	18
Abbildung 4: Prozessschema Stahlschrottaufbereitung inklusive sensorgestützter Sortierung.....	18
Abbildung 5: Modellierter Produktionskostenvergleich der untersuchten Stahlproduktionsrouten.....	34
Abbildung 6: Produktionskostendifferenzen zwischen Scrap0_DRI100 und Scrap100_DRI0 im Zeitverlauf	36

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Angestrebte Grenzwerte für Fremdmittelgehalte in EFR-Schrottspezifikationen. Entnommen aus ((EU-27 Steel Scrap Specification, 2007)).....	13
Tabelle 2: Grundlegende Verfahrensanforderungen für sensorgestützte Sortiersysteme	19
Tabelle 3: Identifizierte Sensortechniken für die sensorgestützte Sortierung	20
Tabelle 4: Nationale FuE Vorhaben zur sensorgestützten Stahlschrottsortierung	22
Tabelle 5: EU geförderte FuE-Vorhaben zur optimierten Schrottaufbereitung	23
Tabelle 6: Forschungsthemen, F&E-Themencluster, und Einzeltechnik-TRLs der identifizierten F&E-Vorhaben	24
Tabelle 7: Einordnung der F&E-Themencluster entlang von Entwicklungsphasen des Systems "sensorgestützte Schrottsortierung"	26
Tabelle 8: Europäische Anbieter von sensorgestützten Sortiersystemen für das Metallrecycling	28
Tabelle 9: Abschätzung des Einsparpotenzials durch die Substitution von DRI durch aufbereiteten Altschrott.....	37
Tabelle 10: Grenzwerte in [wt.-%] für Begleitelemente nach Stahlgüten, nach Viertauer et al. 2024	38
Tabelle 11: Parametrisierung für die Annuisierung	51
Tabelle 12: Angenommene CAPEX für die modellierten Produktionsrouten.....	51
Tabelle 13: Angenommene Energieträger- und Feedstock-Preise.....	51
Tabelle 14: Angenommener CO ₂ -Preis.....	52
Tabelle 15: Technische Inputdaten	52
Tabelle 16: Berechnete freie EUA-Allokation für die Produktionsrouten.....	52
Tabelle 17: Detaillierte Modellierungsergebnisse der techno-ökonomischen Analyse	53

12 Literaturverzeichnis

- A European Steel and Metals Action Plan* (COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS COM(2025) 125 final). (2025). Europäische Kommission. https://single-market-economy.ec.europa.eu/document/download/7807ca8b-10ce-4ee2-9c11-357afe163190_en?filename=Communication%20-%20Steel%20and%20Metals%20Action%20Plan.pdf
- Agora Industrie. (2022). *Transformationskostenrechner Stahl* [MS Excel]. <https://www.agora-industrie.de/daten-tools/transformationkostenrechner-stahl>
- Agora Industry. (2023, Oktober 25). *Global Steel Transformation Tracker*. Global Steel Transformation Tracker. <https://www.agora-industry.org/data-tools/global-steel-transformation-tracker>
- Arun, N., Bühler, W., Cetin, Z., Fuchs, H., Krassnig, H., Linzer, B., Mühlböck, S., & Viertauer, A. (2024). Mastering the Challenges to Produce Automotive Exposed Grade via EAF Steelmaking Route. *AISTech 2024 Proceedings*, 681–689. <https://doi.org/10.33313/388/070>
- Auctioning (EU ETS 1): German Auctioning of Emission Allowances Fourth Quarter 2025*. (2026). Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt (UBA). https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/EN/auctioning/2025/2025_report_Q4.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Bartos, R. & Stahlinstitut VDEh (Hrsg.). (2015). *Stahlfibel*. Verl. Stahleisen.

BDSV - Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (o. J.).

BDSV Markt und Preise Stahlschrott. Markt & Preise. Abgerufen

<https://www.bdsv.org/unser-service/markt-preise/>

Bernhard, C., Gaiser, G., Bernhard, M., Winkler, J., Kern, M., Presoly, P., & Kang, Y. (2025). On the Role of Tramp Elements for Surface Defect Formation in Continuous Casting of Steel. *Steel Research International*, 96(5), 2400494. <https://doi.org/10.1002/srin.202400494>

Blackert, C., & Brümmer, A. (2023). *VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON SCHROTTPRODUKTEN MIT HOHEM REINHEITSGRAD AUS INHOMOGENEM INPUTMATERIAL* (Patent Nr. EP 4 153 368 B1). <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/20231004/patents/EP4153368NWB1/document.pdf>

CAESAR-Konsortium. (o. J.). *Identification and sorting of ferrous fractions by XRF*. Identification and sorting of ferrous fractions by XRF. Abgerufen <https://caesarproject.eu/identification-and-sorting-of-ferrous-fractions-by-xrf/>

Cavaliere, P. (2019). *Clean ironmaking and steelmaking processes: Efficient technologies for greenhouse emissions abatement*. Springer.

Cecil, R. (2025, Juni 3). Iron ore to play key role in a decarbonized future. *S&P Global*. <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/research/iron-ore-to-play-key-role-in-a-decarbonized-future>

Commission introduces surveillance of imports and exports of metal scrap. (o. J.). [Pressemeldung]. Europäische Kommission. Abgerufen https://taxation-customs.ec.europa.eu/news/commission-introduces-surveillance-imports-and-exports-metal-scrap-2025-07-23_en

CORDIS Datenbank. (o. J.). *Projektdarstellung „Recycling-oriented alloy design for next-generation of sustainable metallic materials (ROAD-SiM)“*. Recycling-oriented alloy design for next-

generation of sustainable metallic materials (ROAD-SiM). Abgerufen

<https://cordis.europa.eu/project/id/101062549>

Corneille, A., & Agrawal, A. (2024). *UNLOCKING POTENTIAL IN THE GLOBAL SCRAP STEEL MARKET: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES* (OECD Science, Technology and Industry Policy Papers 170) [Policy Paper]. OECD.

https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/12/unlocking-potential-in-the-global-scrap-steel-market_b7014135/d7557242-en.pdf

Daehn, K. E., Serrenho, A. C., & Allwood, J. (2019). Finding the Most Efficient Way to Remove Residual Copper from Steel Scrap. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 50(3), 1225–1240. <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01537-9>

Daten und Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2024. (2024). WV Stahl.

https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Daten-und-Fakten-2024_RZ-Web.pdf

Dürnwächter, J., Weiß, B., & Blömer, R. (o. J.). *CaCoCa (The Carbon Contracts Calculator)* [Python].

Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Abgerufen

https://github.com/JakobBD/cacoca/blob/main/doc/000_introduction.md

Dworak, S., Fellner, J., Beermann, M., Häuselmann, M., Schenk, J., Michelic, S., Cejka, J., Sakic, A., Mayer, J., & Steininger, K. (2023). Stahlrecycling – Potenziale und Herausforderungen für innovatives und nachhaltiges Recycling. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 75(1–2), 97–107. <https://doi.org/10.1007/s00506-022-00903-3>

Dworak, S., Rechberger, H., & 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.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106072>

Ecodesign for Sustainable Products and Energy Labelling Working Plan 2025-2030 (COM(2025) 187

final). (2025). [COMMUNICATION FROM THE COMMISSION]. Europäische Kommission.

https://environment.ec.europa.eu/document/download/5f7ff5e2-ebe9-4bd4-a139-db881bd6398f_en?filename=FAQ-UPDATE-4th-Iteration_clean.pdf

Energy-Charts Strom-Futures (Base), Handelstag: 21.01.2026. (2026). [Datensatz].

https://www.energy-charts.info/charts/price_futures_bars/chart.htm?l=de&c=DE&datetimepicker=21.01.2026

Entwicklung der Industriestrompreise (SMARD BNetzA). (2025). [Datensatz].

<https://www.smard.de/page/home/topic-article/444/215830>

Environmental organisations, think tanks and recycling industry call for measures to boost the use of

recycled steel in the automotive sector. (2025, Mai 21). [Pressemeldung]. EuRIC, Recycling

Europe AISBL und Weitere. [https://euric.org/images/Press-](https://euric.org/images/Press-releases/Statements/2025_VDEoL_joint_statement_EFFSN_automotive_steel_FINAL_20052025.pdf)

[releases/Statements/2025_VDEoL_joint_statement_EFFSN_automotive_steel_FINAL_20052025.pdf](https://euric.org/images/Press-releases/Statements/2025_VDEoL_joint_statement_EFFSN_automotive_steel_FINAL_20052025.pdf)

ESB Quality Guide V1.1 VDA239-100. (o. J.). ESB - European Steel Business Deutschland GmbH.

Abgerufen <https://www.esb-group.com/wp-content/uploads/2025/03/ESB-Quality-Guide-V1.1-VDA239-100.pdf>

EU-27 Steel Scrap Specification. (2007). European Ferrous Recover and Recycling Federation (EFR).

https://www.mgg-recycling.com/wp-content/uploads/2013/06/EFR_EU27_steel_scrap_specification.pdf

EuRIC, Recycling Europe AISBL. (2025, Mai 6). *Why the sliding scale is a slippery slope for defining green steel*. Why the sliding scale is a slippery slope for defining green steel.

<https://euric.org/resource-hub/position-papers/why-the-sliding-scale-is-a-slippery-slope-for-defining-green-steel>

Europäische Kommission. (o. J.-a). *CORDIS - EU research results*. CORDIS - EU research results.

Abgerufen <https://cordis.europa.eu/>

Europäische Kommission. (o. J.-b). *Waste Shipment Rules*. Waste Shipments. Abgerufen

https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-shipments_en?utm_source=chatgpt.com

Europäischer Rat, Rat der Europäischen Union. (2025, Februar 25). *Circular economy: Council and Parliament strike deal on rules for vehicle circularity and management of end-of-life*

vehicles [Pressemeldung]. Circular economy: Council and Parliament strike deal on rules for vehicle circularity and management of end-of-life vehicles.

<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2025/12/12/circular-economy-council-and-parliament-strike-deal-on-rules-for-vehicle-circularity-and-management-of-end-of-life-vehicles/>

European Steel in Figures 2025. (2025). EUROFER.

https://www.eurofer.eu/assets/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2025/European-Steel-in-Figures-2025_23062025.pdf

Fishedick, M., Marzinkowski, J., Winzer, P., & Weigel, M. (2014). Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. *Journal of Cleaner Production*, *84*, 563–580.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.063>

Fraunhofer IOSB. (o. J.). *Sensorgestützte Sortiersysteme für Schüttgüter und Recycling*.

Sensorgestützte Sortiersysteme für Schüttgüter und Recycling. Abgerufen

<https://www.iosb.fraunhofer.de/de/kompetenzen/optronik/sichtpruefssysteme/sortiersysteme-schuettingueter.html>

Guidance Document n°9 on the harmonised free allocation methodology for the EU ETS – 2024 revision. (2025, Januar 24). Europäische Kommission.

https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/guias_medologicas_y_notas/GD_9_FAR_rev2024_EN.pdf

Härtetechnik Hagen GmbH. (o. J.). *Darstellung des VAR-Verfahrens*. VAR-Verfahren. Abgerufen

<https://haertetechnik-hagen.de/var-verfahren>

Hartung, M., Pothen, F., & Hundt, C. (2025). *Szenarien für den Stahlschrottbedarf der deutschen Stahlindustrie*. Verlag Ernst-Abbe-Hochschule Jena.

Herbst, A., Rehfeldt, M., Breitschopf, B., Lotz, M. T., Marscheider-Weidemann, F., Lösch, O., Deurer, J., & Toro, F. (2025). *Identification, analysis and presentation of the products in the industrial sectors covered by the EU ETS, their economic importance and their significance for CO₂ emissions* (Climate Change 70/2025). Umweltbundesamt.

https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/70_2025_cc.pdf

Höfler, A. (o. J.). *Vom Rohstahl zum Stahl*. tec-science.com. Vom Rohstahl zum Stahl. Abgerufen

<https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/stahl-erzeugung-herstellung/vom-rohstahl-zum-stahl/>

Jahresbericht 2023. (2023). Verein der Kohlenimporteure (VKI).

https://www.kohlenimporteure.de/files/user_upload/jahresberichte/Jahresbericht-2023.pdf

Jimbo, I., Zhang, A., Cramb, A. W., & Fruehan, R. J. (1992). *The reaction of solid copper with FeS-Na₂S Mattes*. 4th International Conference on Molten Slags and Fluxes.

<https://www.pyrometallurgy.co.za/MoltenSlags1992/578-Jimbo.pdf>

Jones, B. (2025, März 21). EU proposes export restrictions as 19M tonnes of metal scrap leave

Europe annually. *resource media*. <https://resourcemediacom.eco/article/eu-proposes-export-restrictions-19m-tonnes-metal-scrap-leave-europe-annually>

Latchem, R. (2025, Dezember 12). EU scrap exports proposals slammed in Germany. *Recycling International*. <https://recyclinginternational.com/commodities/ferrous-metal-recycling/eu-scrap-exports-proposals-slammed-in-germany/62725/>

LESS AISBL. (o. J.). *Low Emission Steel Standard (LESS)*. Low Emission Steel Standard (LESS). Abgerufen <https://lowemissionsteelstandard.org/>

Lösch, O. (2022). *A Technology Model for Optimizing a Sustainable Steelmaking Process* [Masterarbeit]. Harvard University. <https://dash.harvard.edu/entities/publication/5c747f44-a6ef-465d-b629-58cc221a0e12>

Maier, G., Gruna, R., Längle, T., & Beyerer, J. (2024). A Survey of the State of the Art in Sensor-Based Sorting Technology and Research. *IEEE Access*, *12*, 6473–6493. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3350987>

Martinsen, J. (o. J.). *Maximizing Scrap Potential: Why Tomorrow's Green Steel Starts with Today's Scrap*. epico Klimainnovation. epico Green Steel Dialogues. Abgerufen <https://epico.org/en/newsroom/green-steel-dialogues/maximizing-scrap-potential-why-tomorrows-green-steel-starts-with-todays-scrap>

Mendelevitch, R., Repenning, J., Matthes, F. Chr., & Deurer, J. (2024). *Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland—Rahmendaten (Datentabelle)* (Öko-Institut, IREES) [Datensatz]. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgas-projektionen-2024-fuer-deutschland>

Mesina, M. B., De Jong, T. P. R., & Dalmijn, W. L. (2007). Automatic sorting of scrap metals with a combined electromagnetic and dual energy X-ray transmission sensor. *International Journal of Mineral Processing*, *82*(4), 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.10.006>

Pillkahn, H.-B., Soest, P., Stissel, S., & Tholen, J. (2015). *Entwicklung und Test einer Laborvorrichtung zur Zusammenarbeit von Laserablation und laserinduzierter Plasmaspektroskopie an metallischen Sekundärrohstoffen—Arbeitstitel: COLA I (Collaboration Of LIBS and Laser Ablation)*. <https://opac.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32322.pdf>

Projekträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH. (o. J.). *EnArgus Datenbank nationale Forschungsvorhaben der Energieforschung*. EnArgus. Abgerufen www.enargus.de

Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a framework of measures for the acceleration of industrial capacity and decarbonisation in strategic sectors and amending Regulations (EU) 2018/1724, (EU) 2024/1735 and (EU) 2024/3110, 2026/0068 (COD), Europäische Kommission (2026). https://single-market-economy.ec.europa.eu/document/download/9bc8eb85-4d43-4025-be7b-c86b9f3648ec_en?filename=Proposal%20establishing%20measures%20for%20industrial%20capacity%20and%20decarbonisation%20in%20strategic%20sectors%20.pdf

Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on circularity requirements for vehicle design and on management of end-of-life vehicles, amending Regulations (EU) 2018/858 and 2019/1020 and repealing Directives 2000/53/EC and 2005/64/EC, 2023/0284 (COD), Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. Abgerufen https://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2024_2029/plmrep/COMMITTEES/ENVI/DV/2026/02-25/ELV-Provisionalagreement-consolidatedtext-FINAL_EN.pdf

REGULATION (EU) 2024/1157 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 April 2024 on shipments of waste, amending Regulations (EU) No 1257/2013 and (EU) 2020/1056 and repealing Regulation (EC) No 1013/2006, 2024/1157, Europäische Union. Abgerufen https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401157

REGULATION (EU) 2024/1781 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC, 2024/1781, Europäische Union. Abgerufen https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401781

REGULATION (EU) 2024/3110 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 November 2024 laying down harmonised rules for the marketing of construction products and repealing Regulation (EU) No 305/2011, 2024/3110, Europäische Kommission. Abgerufen https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202403110

Rod, O., Becker, C., & Nylén, M. (2006). *Opportunities and dangers of using residual elements in steels: A literature survey* (Jernkontorets Forskning). Jernkontoret. <https://www.jernkontoret.se/globalassets/publicerat/forskning/d-rapporter/d819.pdf?id=1138>

Russo, P., & Pierret, JC. (2024). *CAESAR Deliverable D2.2 Report on scrap characterization* [Project Deliverable]. CAESAR-Konsortium. <https://caesarproject.eu/deliverables/>

Schäfer, P. (2021). *Recycling – ein Mittel zu welchem Zweck? Modellbasierte Ermittlung der energetischen Aufwände des Metallrecyclings für einen empirischen Vergleich mit der Primärgewinnung*. Springer Nature.

Schmidt, C. (2023, April 28). Schrottreycler TSR nimmt in Duisburg neue Aufbereitungsanlage in Betrieb. *EUWID Recycling und Entsorgung*. <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/schrottreycler-tsr-nimmt-in-duisburg-neue-aufbereitungsanlage-in-betrieb-280423/>

Schrottbonus konkret—Sechs Handlungsempfehlungen für die Politik. (o. J.). Bundesvereinigung

Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV). Abgerufen

https://www.bdsv.org/fileadmin/user_upload/Schrottbonus_Konkret_Full_PDF.pdf

Sustainability Indicators Report 2025. (2026). worldsteel. [https://worldsteel.org/wp-](https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-Indicators-publication-2025_Feb-2026-1.pdf)

[content/uploads/Sustainability-Indicators-publication-2025_Feb-2026-1.pdf](https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-Indicators-publication-2025_Feb-2026-1.pdf)

Sutter, J., Adjei, F., Baron, Y., & Kosinska-Terrade, I. (2025). *Boosting the use of recycled steel in the EU automotive industry under the ELV Regulation.* Öko-Institut.

[https://uploads.transportenvironment.org/production/files/2025_04_Report_Recycled_steel](https://uploads.transportenvironment.org/production/files/2025_04_Report_Recycled_steel_EU_automotive_industry_final.pdf)

[_EU_automotive_industry_final.pdf](https://uploads.transportenvironment.org/production/files/2025_04_Report_Recycled_steel_EU_automotive_industry_final.pdf)

Transport & Environment (T&E). (2025, April 9). *Setting recycled-content targets for steel under the*

ELV Regulation. [https://www.transportenvironment.org/articles/setting-recycled-content-](https://www.transportenvironment.org/articles/setting-recycled-content-targets-for-steel-under-the-elv-regulation)

[targets-for-steel-under-the-elv-regulation](https://www.transportenvironment.org/articles/setting-recycled-content-targets-for-steel-under-the-elv-regulation)

TSR Group GmbH & Co. KG. (o. J.). *Produktvorstellung TSR40.* Unverzichtbar für nachhaltige

Stahlprodukte. Heute und morgen. Abgerufen <https://www.tsr.eu/produkte/tsr40/>

TSR Group GmbH & Co. KG. (2021, August 28). *Zuwendungsbescheid für gemeinsames Projekt*

REDERS [News]. Zuwendungsbescheid für gemeinsames Projekt REDERS.

<https://www.tsr.eu/news/detail/zuwendungsbescheid-fuer-gemeinsames-projekt-reders/>

VDA-Präsidentin Hildegard Müller zur End-of-Life-Verordnung. (o. J.). [Pressemeldung]. Verband

der Automobilindustrie (VDA). Abgerufen

[https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/2025/251212_VDA-](https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/2025/251212_VDA-Kommentierung_ELV-Einigung-Trilog)

[Kommentierung_ELV-Einigung-Trilog](https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/2025/251212_VDA-Kommentierung_ELV-Einigung-Trilog)

Vogl, V., Åhman, M., & Nilsson, L. J. (2018). Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, 203, 736–745.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>

- World Steel in Figures 2025*. (o. J.). worldsteel. Abgerufen <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025-3.pdf>
- Wörtler, M., Schuler, F., Voigt, N., Schmidt, T., Dahlmann, P., Lungen, H. B., & Ghenda, J.-T. (2013). *Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050*. The Boston Consulting Group (BCG) und VdEH. https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/Schlussbericht-Studie-Low-carbon-Europe-2050_-Mai-20131.pdf
- Xiong, T., Ye, W., & Xu, X. (2021). Combination of Dual-Energy X-ray Transmission and Variable Gas-Ejection for the In-Line Automatic Sorting of Many Types of Scrap in One Measurement. *Applied Sciences*, 11(10), 4349. <https://doi.org/10.3390/app11104349>
- Yaduvanshi, A. (2025, April). Biochar Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (Pyrolysis, Gasification), By Application (Farming, Livestock, Power Generation) and By Region (North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, LATAM) Forecasts, 2025-2033. *straits research*. <https://straitsresearch.com/report/biochar-market/>
- Zadeh, J. (2025, September 3). Iron Ore Price Forecast: Market Analysis and Projections for 2025-2030. *Discovery Alert*. <https://discoveryalert.com.au/iron-ore-price-forecast-2025-analysis-projections/>
- Zulhan, Z., Huellen, M., & Schrade, C. (2006). *EAF-Based Flat-Steel Production Applying Secondary Metallurgical Processes*. (Paper 7.1). https://www.researchgate.net/publication/257927955_EAF-Based_Flat-Steel_Production_Applying_Secondary_Metallurgical_Processes