



Stahlrecycling – Potenziale und Herausforderungen für innovatives und nachhaltiges Recycling

Sabine Dworak · Johann Fellner · Martin Beermann · Monika Häuselmann · Johannes Schenk · Susanne Michelic · Julian Cejka · Amin Sakic · Jakob Mayer · Karl Steininger

Angenommen: 24. Oktober 2022
 © Der/die Autor(en) 2022

Zusammenfassung Stahlschrott ist ein wesentlicher Sekundärrohstoff im Stahlherstellungsprozess und ein wichtiger Grundpfeiler für eine CO₂-arme Stahlindustrie. Im Vergleich zur Stahlproduktion durch die Primärroute benötigt das Einschmelzen von Stahlschrott weniger Ressourcen und birgt somit sowohl umwelttechnische als auch wirtschaftliche Vorteile. Ein erhöhtes und optimiertes Recycling von Stahlschrott zur Erzeugung von Hochleistungsstählen setzt jedoch genaue Kenntnisse über verfügbare Schrottqualitäten voraus. Insbesondere Alt-

schrottklassen können die geforderten Qualitätskriterien hinsichtlich ihrer Zusammensetzung nicht erfüllen.

Die gegenständliche, interdisziplinäre Arbeit untersucht Optimierungspotenziale für ein nachhaltiges Recycling von Stahl in Österreich. Dabei wurde die Schrottverfügbarkeit quantitativ und auch qualitativ durch eine Materialfluss- und qualitative Material-Pinch-Analyse ermittelt. Die Ergebnisse wurden durch Stakeholderbefragungen untermauert. Im Zuge der Stakeholderbefragungen wurde auch der Innovationsbedarf der Branche ermittelt. Weiters wurden werkstofftechnologische Auswirkungen für Prozesse und Produkte analysiert und zusammengefasst.

Durch den erhöhten Schrotteinsatz, vor allem durch Altschrott, kommt es zu erhöhten Anteilen an Begleitelementen in der Stahlproduktion. Die Arbeit zeigt, dass der Anteil an Altschrott am Gesamtschrottaufkommen bis zu 75% erreichen wird, gegenwärtig aber aufgrund des aktuellen Schrotthandlings und damit einhergehenden Verunreinigungen nur ein Teil des Altschrotts tatsächlich auch innereuropäisch bzw. in Österreich für die Erzeugung von Hochleistungsstählen ausgenutzt werden kann. Durch verbesserte Vorsortierung, Entfernung der unerwünschten Begleitelemente durch sekundärmetallurgische Prozesse und durch besseres Verständnis der Wechselwirkung unterschiedlicher Begleitelemente kann das vorhandene Schrottpotenzial besser ausgeschöpft werden. Die Nutzung der in sekundären Rohstoffen gespeicherten „grauen“ Energie ermöglicht nicht nur für den Stahlsektor selbst eine effektive Entwicklungsoption Richtung Klimaneutralität, sondern auch für andere volkswirtschaftliche Bereiche durch insgesamt reduzierten Primärenergiebedarf und Senkung des Fußabdrucks zahlreicher Wertschöpfungsketten.

Schlüsselwörter Stahl Recycling · Materialflussanalyse · Schrottqualität · Begleitelemente · Rahmenbedingungen

Recycling of steel – potentials and challenges for innovative and sustainable recycling

Abstract Steel scrap is an essential secondary raw material in the steel production process and an important cornerstone for a low-carbon steel industry. Compared to steel production through the primary route, melting down steel scrap requires fewer resources and thus has both environmental and economic advantages. However, increased and optimised recycling of steel scrap as a resource for the production of high-performance steels requires precise knowledge of available scrap qualities. Post-consumer scrap classes in particular cannot fulfil the required quality criteria with regard to their composition.

The present interdisciplinary work investigates optimisation potentials for sustainable recycling of steel in Austria. The availability of scrap was determined quantitatively and also qualitatively by means of material flow and qualitative material pinch analysis. The results were supported by stakeholder interviews. In the course of the interviews, the innovation needs of the industry were also determined. Furthermore, material-technological effects for processes and products were analysed and summarised.

The work shows that the share of old scrap in the total scrap volume will reach up to 75%. Due to the current scrap handling and the associated impurities, at present only part of this old scrap can be utilised domestically for the production of high-performance steels. This resource potential can be better exploited through improved pre-sorting, removal of undesirable accompanying elements through secondary metallurgical processes and through

DI Dr. S. Dworak, BSc (✉)
 Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement, Technische Universität Wien, Wien, Österreich
sabine.dworak@tuwien.ac.at

DI M. Beermann
 LIFE – Institut für Klima, Energie und Gesellschaft, JOANNEUM RESEARCH, Graz, Österreich

DI M. Häuselmann
 K1-MET GmbH, Leoben, Österreich

Univ.-Prof. DI Dr. J. Schenk
 Lehrstuhl für Eisen- und Stahlmetallurgie, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Assoc. Prof. DI Dr. S. Michelic · DI J. Cejka
 Christian Doppler Labor für Einschussmetallurgie in der modernen Stahlherstellung, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

DI A. Sakic
 Lehrstuhl für Stahl design, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Dr. J. Mayer · Univ.-Prof. Mag. Dr. K. Steininger
 Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Universität Graz, Graz, Österreich

a better understanding of the interaction of different accompanying elements. The use of energy already embedded in secondary raw materials enables climate neutral development not only in the steel industry but also for other sectors by reducing primary energy demand and a lower footprint along multiple value chains.

Keywords Steel Recycling · Material Flow Analysis · Scrap Quality · Tramp Elements · Framework Conditions

1 Einleitung

Stahl ist einer der am häufigsten verwendeten Rohstoffe in unserer Gesellschaft. Die weltweite Rohstahlproduktion hat sich in den letzten Jahrzehnten fast verdoppelt (basierend auf WSA 2020). In den wohlhabenden Regionen (z.B. USA oder EU) ist der Stahlverbrauch jedoch stagnierend. Für die kommenden Jahre wird weltweit nur ein moderates oder gar kein weiteres Wachstum erwartet (Hatayama et al. 2010). Durch stagnierende Stahlproduktionsraten wird ein höherer Anteil von Schrott als Ressource für die Rohstahlproduktion ermöglicht. Dies wäre nicht nur in Bezug auf Ressourcenschonung von Vorteil, sondern auch in Bezug auf Umweltauswirkungen (z.B. Verringerung der CO₂-Emissionen (Broadbent 2016), geringere Eutrophierung, Versauerung und photochemische Oxidation (López et al. 2020)).

Die durch den Schrott eingetragenen Begleitelemente, wie Kupfer (Cu), Molybdän (Mo), Chrom (Cr), Zinn (Sn) oder Nickel (Ni) beeinflussen je nach Stahlgüte sowohl metallurgische Prozesse als auch werkstoffliche Produkteigenschaften, wobei einige der genannten auch Legierungselemente für bestimmte Stahlgüten darstellen. Metallurgisch resultieren daraus einerseits notwendige Änderungen in der Prozessführung, andererseits die Beeinflussung von eigentlich bereits gut untersuchten Reaktionen und Wechselwirkungen, wie zum Beispiel das Abscheideverhalten von nichtmetallischen Einschlüssen

bis hin zu Problemen in der Weiterverarbeitung der Halbzeuge.

Im Zuge der gegenständlichen Arbeit werden folgende Aspekte des Stahlrecyclings beleuchtet und Schlussfolgerungen zur aktuellen Lage und dem Forschungsbedarf herausgearbeitet.

1.1 Verfügbarkeit von Stahlschrott und -qualitäten

In den letzten Jahrzehnten wurden neben quantitativen Analysen von Stahlströmen auch zunehmend qualitative Aspekte berücksichtigt. Dahingehend wurden der Gehalt an Verunreinigungen in Form spezifischer Begleitelemente (meist Cu, Ni, Mo, Cr und/oder Sn) und mögliche Maßnahmen zu deren Entfernung untersucht (z.B. Daehn et al. 2019; Daigo et al. 2021). Es gibt jedoch nur wenige Studien, die den verfügbaren Schrott und seine Zusammensetzung in Bezug auf den Rohstahlbedarf und seine Anforderungen untersuchen (z.B. global für Cu Daehn et al. 2017, für Japan z.B. Daigo et al. 2017). Den Ergebnissen dieser Studien ist gemeinsam, dass sie auf einen Überschuss an Schrott mit niedrigem Reinheitsgrad hinweisen, der zur Wiederverwertung mit Primärstahl verdünnt werden muss. In Japan ist dieser Überschuss bereits Realität (Igarashi et al. 2007) und auf globaler Ebene könnte es in naher Zukunft auch so weit kommen (Daehn et al. 2017).

Österreich ist nicht nur eines der Länder mit der höchsten Pro-Kopf-Stahlproduktion der Welt (AT: 0,9 t/Jahr/Kopf, EU: 0,35 t/Jahr/Kopf, weltweit: 0,25 t/Jahr/Kopf; Eurofer 2021), sondern weist auch ein anspruchsvolles Produktportfolio auf. Dieses besteht überwiegend aus Flacherzeugnissen (World Steel Association 2020), die einen hohen Reinheitsgrad der Ressourcen erfordern. Das bedeutet eine besondere Herausforderung beim angestrebten erhöhten Einsatz von Schrott zur Rohstahlproduktion.

Um diese Umstände zu untersuchen, wurde in der gegenständlichen Arbeit eine Fallstudie für Österreich für den

Zeitraum von 2008 bis 2030 durchgeführt, die auf einem ähnlichen Modell für die EU basiert (Dworak et al. 2022; Dworak und Fellner 2021).

In dieser Analyse werden die Qualität (definiert durch die Summe aus Cu, Ni, Mo, Cr und Sn) und die entsprechenden Mengen an verfügbarem Schrott mit den Bedarfsmengen und Qualitätsansprüchen der Rohstahlproduktion verglichen, um zu untersuchen, inwieweit die Rohstahlnachfrage durch sekundäre Ressourcen gedeckt werden kann.

In Befragungen der wichtigsten österreichischen Stakeholder der Stahl- und Schrottindustrie sowie des metallurgischen Anlagenbaus wurden Informationen zum Anfall bzw. Bedarf von Schrottmengen und -qualitäten in Österreich sowie zum Schrotthandling erhoben. Die Informationen dienten zur Verifizierung für die modellunterstützte Materialflussanalyse. Weiters wurde der Innovationsbedarf zur Erhöhung der Schrottverfügbarkeit und vor allem dessen Einsatzfähigkeit aus Sicht der Stakeholder erhoben.

1.2 Auswirkungen eines vermehrten Schrotteinsatzes auf Stahlwerksprozesse und Werkstoffqualitäten

Daigo et al. (2021) führte eine umfassende Literaturrecherche zum Einfluss von insgesamt fünfzehn Begleitelementen auf die sechs wesentlichsten Eigenschaften von Kohlenstoffstählen durch. Diese beinhaltet auch die Elemente Kupfer, Chrom, Molybdän, Nickel, Arsen und Zinn, die insbesondere bei den Stakeholderbefragungen mit Vertretern der heimischen Stahlproduzenten als relevant angesehen werden. Tab. 1 fasst die Ergebnisse der Literaturrecherche (Daigo et al. 2021) über den Einfluss dieser sechs Elemente zusammen.

Aufgrund unterschiedlicher Anwendungsfälle und Produktionsrouten bergen Begleitelemente verschiedene Problematiken, wozu die Zusammenfassung in den Ergebnissen zu finden ist.

Tab. 1 Beeinflussung ausgewählter Elemente auf Produkteigenschaften mit +: Positiver Einfluss; -: Negativer Einfluss; Nein: Kein Einfluss; ±: Positiver oder negativer Einfluss. (Daigo et al. 2021)

Eigenschaft	As	Cu	Cr	Mo	Ni	Sn
Zugfestigkeit	+	+	+	+	+	+
Duktilität		-	-	(Nein)	(-)	-
Streckgrenze		+	+	+	+	
Schweißneigung		-	-	-	(-)	
Bruchzähigkeit	-	-	±	±	+	

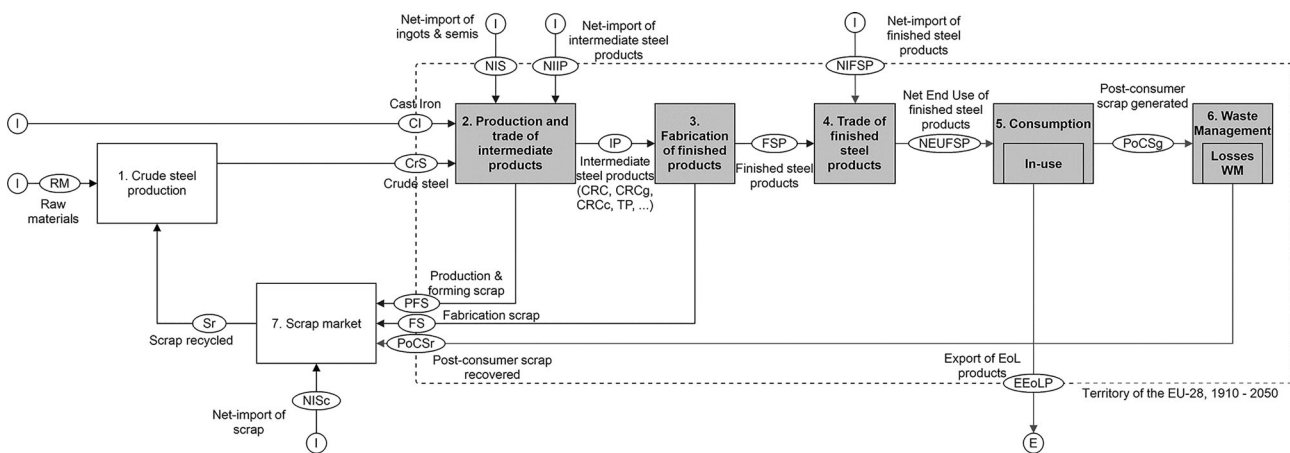


Abb. 1 Vereinfachtes MFA-System für die österreichische Stahlindustrie

1.3 Volkswirtschaftliche und klimapolitische Einbettung eines vermehrten Schrotteinsatzes

Die Relevanz von verstärktem Stahlschrotteinsatz für Klimaschutz und wirtschaftliche Entwicklung zur Bedienung einer auch zukünftig hohen Stahlnachfrage wird durch Betrachtung zwei zentraler im klimapolitischen Kontext vorliegender Knappheiten deutlich. Erstens, das noch zur Verfügung stehende Treibhausgasbudget zur Einhaltung der Pariser Klimaziele ist knapp und begrenzt (Meyer und Steininger 2017). Anstelle eines in der Zukunft liegenden Zieljahrs, in dem die Netto-Emissionen von Treibhausgasen (THG) auf Null sinken, ist vielmehr die Geschwindigkeit der Reduktion bis zu diesem Zeitpunkt relevant, um die kumulativen Einträge in die Atmosphäre mit dem zur Verfügung stehenden THG-Budget zu vereinen. Das gilt auch für den Eisen- und Stahlsektor. Zweitens, neben dem Ersatz von Eisen und Stahl durch andere emissionsärmere Materialien in unterschiedlichsten Anwendungen (z. B. im Hoch- und Tiefbau) ist vor allem der Umstieg von einer zurzeit intensiven Nutzung fossiler Energieträger in der Primärproduktion auf erneuerbare klimafreundlichere Energieträger ein zentrales Thema für die strategische Neuausrichtung des Stahlsektors.

Tab. 2 Qualitätsklassen basierend auf max. tolerierbarem Anteil von Begleitelementen. (Dworak und Fellner 2021)

Diese klimafreundlicheren erneuerbaren Energieträger sind jedoch vor allem aus inländischen Quellen knapp (AEA 2022; WKO 2019). Beim Ausloten unterschiedlicher Zugänge zur Bewältigung dieser Knappheiten und damit verbundener Risiken zeigt sich die Relevanz einer verstärkten kreislaufwirtschaftlichen Nutzung von Stahlschrotten.

2 Methoden und Daten

2.1 Verfügbarkeit von Stahlschrott und -qualitäten

2.1.1 Materialfluss- und qualitative Material-Pinchanalyse

Materialflussanalyse (MFA) MFA (nach Baccini und Brunner 1991) wird häufig verwendet, um Materialflüsse, ihre Quellen und Senken und deren Zusammenhänge zu analysieren. Im Allgemeinen ermöglicht die MFA die Bewertung der Materialflüsse und -lager in einem räumlich und zeitlich definierten System. MFA basiert auf dem Gesetz der Massenerhaltung. Durch Bilanzierung werden alle Inputs, Lager und Outputs des entsprechenden Materials jedes Prozesses, der Teil des bewerteten Systems ist, analysiert.

Abb. 1 zeigt das MFA-System zur Modellierung der Stahlströme (übernommen aus Dworak et al. 2022). Prozes-

se außerhalb der Systemgrenzen werden nicht bilanziert, sind aber der Vollständigkeit halber dargestellt. Alle Ströme sind einerseits einem bestimmten Stahlprodukt zugeordnet, das andererseits für einen bestimmten Sektor des Endverbrauchs bestimmt ist. Diese Zuordnung dient in Folge zur Qualitätszuordnung.

Als geografische Grenze für die Analyse wurden die geografischen Grenzen Österreichs gewählt, wobei der Zeitraum 2008 bis 2030 analysiert wurde.

Es wurden Produktionsdaten aus frei zugänglichen Statistiken (z. B. World Steel Association 2020) und Produktionsdatensätze der österreichischen stahlproduzierenden Unternehmen verwendet, die von der Wirtschaftskammer Österreich (WKO) bereitgestellt werden. Die Transferkoeffizienten basieren auf vorhandenen Studien (Cullen et al. 2012; Dworak et al. 2022; Dworak und Fellner 2021) und wurden mit den oben genannten Datensätzen der WKO, welche auch Lieferdaten in bestimmten Sektoren enthalten, kalibriert.

Beurteilung der Qualität Die Qualität von Stahl und Schrott wurde anhand des Verunreinigungsgrads der fünf wichtigsten Begleitelemente (Σ von Cu, Sn, Cr, Ni und Mo) bewertet. Es wurden vier Qualitätsklassen gewählt (siehe Tab. 2) und bestimmten Stahlerzeugnissen (z. B. bestimmten Flachstahl-,

Qualitätsklasse	Max. Anteil von Begleitelementen [%]	Typische Stahlprodukte in dieser Klasse
Q1	< 0,18	Hauptsächlich kalt gewalzte Flachprodukte
Q2	0,18–0,25	Rohre, Platten, heißgewalzte Flachprodukte
Q3	0,25–0,35	Heißgewalzte Stabprodukte, Platten für den Bausektor
Q4	> 0,35	Bewehrungsstahl, Schienen, Profile

Langstahl- oder Profilstahlerzeugnissen) zugeordnet, die für bestimmte Verwendungszwecke bestimmt sind (z.B. Kraftfahrzeuge, Metallwaren oder Industrieanlagen). Die gewählten Qualitätsklassen Q1 bis Q4 korrelieren zum Teil mit den Schrottklassen nach der EFR-Spezifikation (European Ferrous Recovery und Recycling 2007). So ist beispielsweise der Schrott der Klasse E3 überwiegend der Qualitätsklasse Q3/Q4 zuzuordnen, während die Klassen E8 und E6 überwiegend den Qualitätsklassen Q1 und Q2 angehören.

Qualitative Material Pinch Analyses (MPA) Linnhoff & Hindmarsh (1983) entwickelten die Pinch-Analyse, um

den Energiebedarf in der Industrie zu minimieren. In den letzten Jahrzehnten wurde das Konzept auch zunehmend auf Materialströme angewandt (z.B. Daehn et al. 2017). Dabei wird die Tatsache berücksichtigt, dass verschiedene Prozesse und Produkte Materialien mit unterschiedlicher Qualität (Reinheit) erfordern.

Dieser Ansatz wurde zum Vergleich der verfügbaren Schrottmenge mit dem Bedarf an Rohstahl herangezogen, wobei die Reinheit des Schrotts und die Anforderungen an Rohstahl berücksichtigt werden.

Szenarien zur Schrottverfügbarkeit

Österreich ist wirtschaftlich und geografisch in Europa eingebettet, daher spielt Handel eine wichtige Rolle. Diese Verflechtung wird durch das hohe Produktionsvolumen im Verhältnis zur Einwohnerzahl und das spezifische, anspruchsvolle Portfolio in Österreich noch verstärkt. Daher wurden folgende Szenarien zur Schrottverfügbarkeit entwickelt.

In *Szenario 1* (Schrottverfügbarkeit EU) basiert die Schrottverfügbarkeit auf dem modellierten Schrottangebot in der EU aus dem Modell von Dworak et al. (2022). Die Gesamtmenge an verfügbarem Schrott wurde relativ zur Rohstahlproduktion gesetzt. Diese Annahme basiert auf der Tatsache, dass die Pro-Kopf Stahlproduktion ungleichmäßig verteilt ist (z.B. Österreich: sehr hoch, Kroatien: wenig bis keine). In einem offenen Wirtschaftsraum macht es daher Sinn, die Schrottverfügbarkeit auf die Rohstahlproduktionsmengen zu beziehen, und nicht auf die Einwohnerzahl der einzelnen Länder. Die Anteile der Qualitätsklassen am Altschrott wurden von dem in der EU anfallenden Altschrottmix übernommen.

In *Szenario 2* (Neuschrott AT, Altschrott EU) wird davon ausgegangen, dass die Stahlwerke Zugriff auf alle Neuschrotte haben, die in den Verarbeitungsstufen aus ihrer eigenen Produktion anfallen (Produktions- und Umformschrott (interner Neuschrott) sowie Fabrikationsschrott (externer Neuschrott)). Auch hier wird die Summe des gesamt verfügbaren Schrotts auf die Rohstahlproduktion in Österreich bezogen (s. Szenario 1). Die Anteile der Qualitätsklassen am Altschrott wurden von dem in der EU anfallenden Altschrottmix übernommen.

Die Realität zeigt, dass Österreich wenig bis keinen Altschrott importiert, oder diesen sogar exportiert. In *Szenario 3* (Neuschrott AT, Altschrott AT) wurde angenommen, dass, wie in Szenario 2, Neuschrott aus heimischer Produktion (interner Neuschrott und aller aus den heimisch produzierten Stahlprodukten resultierender externer Neuschrott, s. Szenario 1&2) verfügbar ist. Als verfügbarer Altschrott wurden die Mengen angenommen, die in Österreich anfallen (basierend auf Pro-Kopf-Altschrottanfall in der EU). Dies führt zu sehr viel niedrigeren Schrottmengen und damit zu niedrigeren potenziellen Schrottraten (Schrott vs. Rohstahlbedarf) als in den Szenarien 1&2.

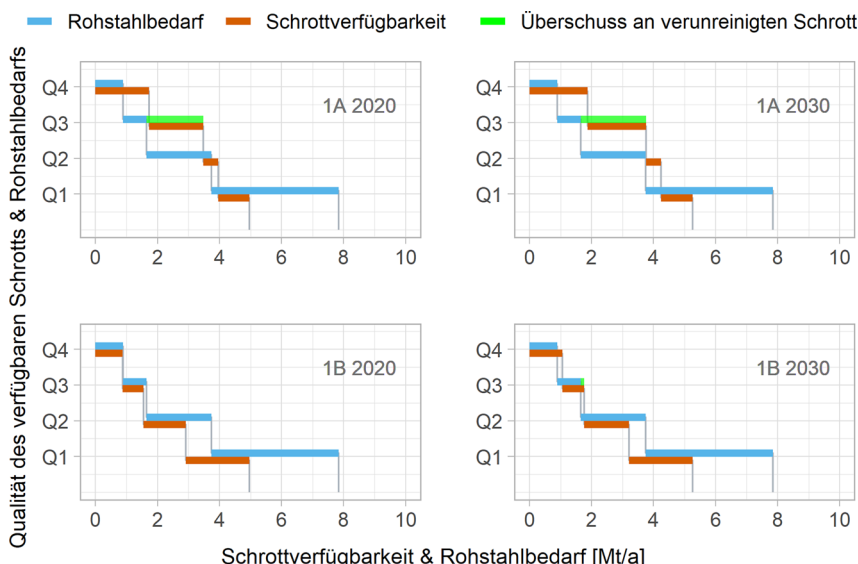


Abb. 2 Qualitative Material-Pinch-Analyse, Szenario 1 (Schrottverfügbarkeit EU)

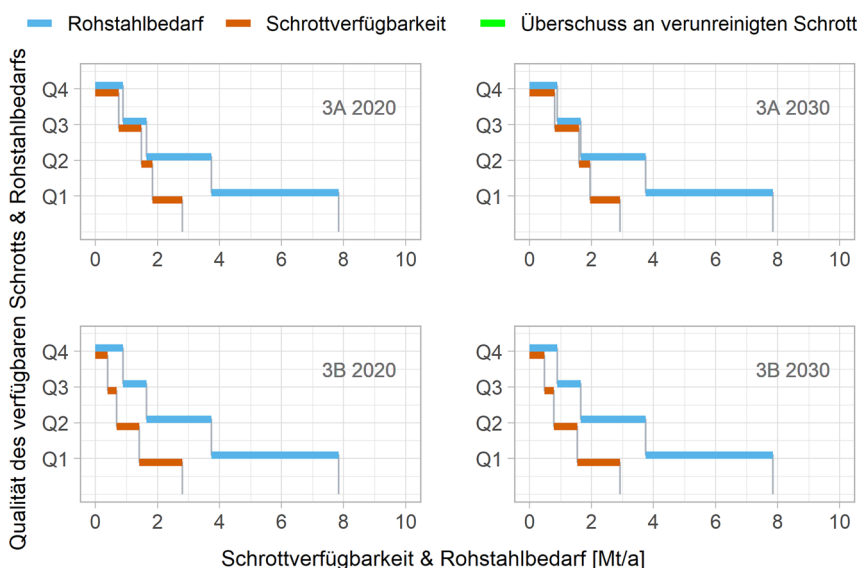


Abb. 3 Qualitative Material-Pinch-Analyse, Szenario 2 (Neuschrott AT, Altschrott EU)

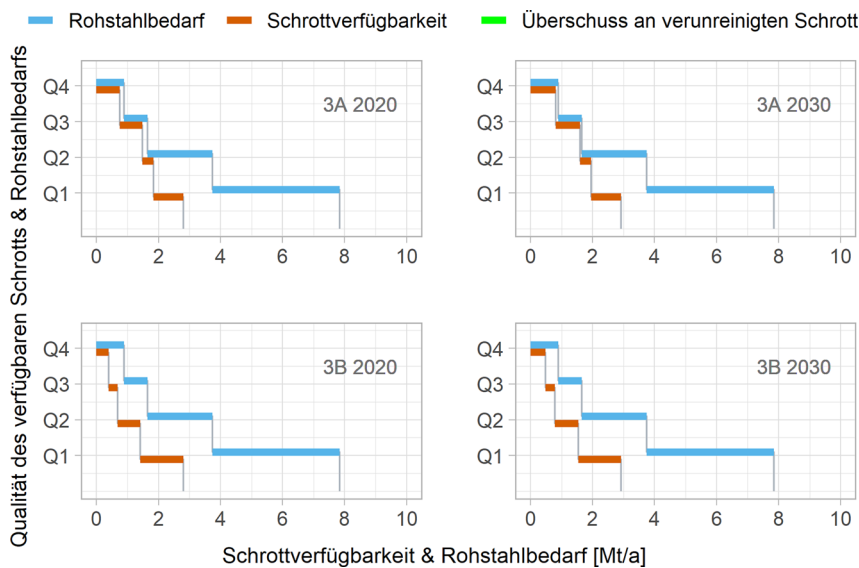


Abb. 4 Qualitative Material-Pinch-Analyse, Szenario 3 (Neuschrott AT, Altschrott AT)

Behandlung von Altschrott Abgesehen vom Schrottaufkommen ist die Behandlung essenziell für die Reinheit der Fraktionen. Neuschrott ist für gewöhnlich in seiner Qualität bekannt und wird dementsprechend direkt eingesetzt (interner Neuschrott) oder entsprechend gehandelt (rücklaufender Neuschrott). Behandlungen haben Einfluss auf die Zusammensetzung von Altschrott, da dieser oft gemischt und/oder kontaminiert anfällt. Die folgenden zwei Optionen wurden berücksichtigt:

Option A – Aktuelle Situation: Im Moment bleibt Altschrott weitgehend unbehandelt. Studien (z. B. Daehn et al. 2017) zeigen, dass der Großteil dieses Schrotts mit hohen Anteilen an Begleitelementen belastet ist. Daraus folgt, dass Altschrott in die Qualitätsklassen Q3/Q4 eingestuft wird.

Option B – Theoretisches Sortierpotenzial: Diese Option repräsentiert das theoretische Potenzial von Sortierung. Dabei wird angenommen, dass die Zusammensetzung des Schrotts jener der entsprechenden Stahlprodukte (nach der entsprechenden Lebensdauer) entspricht.

2.1.2 Stakeholderbefragungen

Die Stakeholderinterviews wurden einheitlich nach einem erarbeiteten Fragenkatalog durchgeführt. Dabei wurden innerhalb von rund 7 h insgesamt 6 Interviews geführt, welche zu 185 Transkriptionsseiten verarbeitet wurden.

2.2 Auswirkungen eines vermehrten Schrotteinsatzes auf Stahlwerksprozesse und Werkstoffqualitäten

Im Zuge der gegenständlichen Arbeit wurde eine Recherche durchgeführt, um die Auswirkungen von erhöhten Begleitelementanteilen zusammenzufassen und mögliche sekundärmetallurgische Interventionen aufzuzeigen.

2.3 Rahmenbedingungen für die Entwicklung eines vermehrten Schrotteinsatzes

Die Ergebnisse aus den Schrottverfügbarkeitsanalysen wurden auf ihre Kompatibilität mit und Auswirkung auf die aktuelle Klimastrategie in Österreich analysiert.

3 Ergebnisse

3.1 Verfügbarkeit von Stahlschrott und -qualitäten

3.1.1 Materialflussanalyse zur Verfügbarkeit von Stahlschrott

In Abb. 2 und 3 und 4 sind die Ergebnisse der qualitativen Material-Pinch-Analyse grafisch dargestellt. Die Grafik zeigt den verfügbaren Schrott und Rohstahlbedarf (x-Achse) und deren vorliegende Qualität (Qualitätsstufen basierend auf Begleitelementgehalt, y-Achse). Die Stufendarstellung wird der Tatsache gerecht, dass hochwertige Ressourcen (hochreine Schrotte,

Rohstahl von primären Ressourcen) für die Herstellung von Produkten mit weniger anspruchsvollen Anforderungen herangezogen werden kann, aber nicht umgekehrt.

Option A – Aktuelle Situation Szenario 1 und 2 (oberer Teil in Abb. 3 und 4) zeigen eine Zunahme von Überschuss an Schrott mit niedrigem Reinheitsgrad. Der Überschuss an Schrott mit niedrigem Reinheitsgrad beläuft sich in den Jahren 2020 bis 2030 auf etwa 2 Mio. t/Jahr, was etwa 40 % des verfügbaren Schrotts ausmacht. Szenario 3 weist keinen Überschuss an Schrott mit niedrigem Reinheitsgrad auf, was auf den geringeren Anteil an Altschrott zurückzuführen ist, führt aber auch zu einer geringeren möglichen Schrottquote (Gesamtschrottmenge im Verhältnis zur Rohstahlnachfrage) von 36 % (2020) bis 37 % (2030) gegenüber 63 % (2020) bis 67 % (2030) in den Szenarien 1&2 führt. Das bedeutet, dass die Erhöhung der Schrottrate jedenfalls Interventionen erforderlich macht.

Option B – Theoretisches Sortierpotenzial Mit entsprechenden Interventionen könnte der Überschuss an Schrott niedriger Reinheit weitgehend in der österreichischen Stahlindustrie verwendet werden. Dies ist im unteren Teil der Abb. 2 und 3 und 4 dargestellt.

Vollständige Sortierung (Rückbau und kontaminationsfrei) würde den Anteil an Schrott mit hohen Gehalten an Begleitelementen und damit auch den Überschuss an diesem reduzieren. Das theoretische Potenzial erlaubt den Einsatz des Großteils des Schrottes. Es kommt trotzdem zu einem Überschuss an Schrott geringer Reinheit (0,1 Mio. t/Jahr im Jahr 2030). Dies ist vor allem dem hoch anspruchsvollen Portfolio der österreichischen Stahlindustrie geschuldet (hoher Anteil an Flachprodukten). Bei entsprechender Sortierung und Charakterisierung der Altschrottfractionen ist zu erwarten, dass das Angebot differenzierter wird und so auch ein differenzierter Zugriff auf Altschrott ermöglicht wird, was den Zugriff auf entsprechende Qualitäten möglich macht und so auch dieses Potenzial voraussichtlich ausgenutzt werden kann.

3.1.2 Ergebnisse aus den Stakeholder-Interviews

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Stakeholderbefragung zusammengefasst.

Tab. 3 Schrottbedarf und Schrottherkunft [1000 t/a] für die Stahlerzeugung in Österreich (im Jahr 2017)

	Altschrott		Produktionsschrott				Shredderschrott				Sonstige		Stahlbären	Gesamt			
	E1	E3	E1/E3	E2	E8	E2/E8	E6	E3/E8	E40	E5M	E5G	EHRM			E46	E99	
Herkunft – Inland	64	181	60	34	120	45	26	28	38		12	0	3	18	4	4	638
Herkunft – Import	55	117	34	11	181	49	410	0	0		2	0	1	1	0	3	865
Schrottbedarf	119	298	95	45	302	93	436	28	38		15	0	4	18	4	7	1503
	513			876				28	38		48						
Anteil – Inland	60 %			26 %				100 %	100 %		85 %						42 %
Anteil – Import	40 %			74 %				0 %	0 %		15 %						58 %

Schrottbedarf und -verfügbarkeit In Österreich wurden 2017 insgesamt ca. 1,5 Mio. t Schrott zur Stahlherstellung (sowohl in den LD-Konvertern der integrierten Stahlwerke als auch in den Elektrolichtbogenöfen) eingesetzt. Diese 1,5 Mio. t Schrott umfassen die über den Schrotthandel abgedeckten Mengen, wobei sich der Anteil des importierten Schrotts auf 58 % beläuft und der Anteil des inländischen Schrotts bei 42 % liegt. Der Eigenschrott der Stahlherzeuger, der als werksinterner Rücklauf in der Stahlproduktion eingesetzt wird, ist in dieser Menge nicht enthalten. Bei Betrachtung der inländischen bzw. der importierten Schrottmengen in den Schrottgruppen Alt- und Produktionsschrott zeigt sich, dass Altschrott zum größeren Teil aus inländischen Quellen (60 %) und Produktionsschrott zum größten Teil (74 %) über importierten Schrott (v. a. aus der Fahrzeugindustrie) gedeckt werden.

Die Import-Export-Bilanz des österreichischen Schrotthandels ist in etwa ausgeglichen, mit ca. 1 Mio. t importierten und 1 Mio. t exportiertem Schrott. Die Importmengen lassen sich folgenden Hauptländern zuordnen: Deutschland (544.000 t/a), Tschechien (225.000 t/a), Slowakei (80.000 t/a), Italien (17.000 t/a) und Slowenien (16.000 t/a). Die Exportmengen gehen zum größten Teil nach Italien (550.000 t/a) und Deutschland (300.000 t/a), der Rest über Kroatien und Rumänien in die Türkei.

Tab. 3 fasst die Ergebnisse des derzeitigen Schrottbedarfs für die Stahlerzeugung in Österreich – unterteilt nach Schrottklassen (in den Hauptgruppen Altschrott und Produktionsschrott) – und der verfügbaren Schrottmengen aus dem Inland bzw. Import zusammen.

Aufgrund der geplanten Technologieumstellung in der Primärstahlerzeugung von der Hochofenroute auf

Elektrolichtbogenöfen wird eine Steigerung des zusätzlichen Schrottbedarfs von 70 bis 100 % in den nächsten 5 bis 10 Jahren erwartet. Daraus ergibt sich ein mittelfristiger Zusatzbedarf von zumindest 1 Mio. t Schrott pro Jahr. Auch wenn diese Gesamtmenge in etwa der heute aus Österreich exportierten Schrottmenge entspricht, könnten damit die Mengen in den benötigten Schrottklassen vom Schrotthandel derzeit nicht bereitgestellt werden. Die befragten Unternehmen haben als mögliche Strategien zur Erhöhung der Schrottverfügbarkeit in den benötigten Schrottklassen genannt:

- Upcycling des in Österreich anfallenden Altschrotts, Schrotthändler müssen zukünftig auch in die Schrottaufbereitung investieren.
- Rückgewinnung von Eisen aus LD-Schlacken.
- End-of-Life-Fahrzeuge in Österreich besser verwerten (Verhinderung des Exports von Altfahrzeugen).

Für die Identifizierung des Innovationsbedarfs in der Schrottaufbereitung und -sortierung ist die Kenntnis der heutigen Schrottlogistik der Ausgangspunkt. Diese unterscheidet sich bei Schrotthändlern und beim Stahlherzeuger. Grundsätzlich betrifft die folgende Zusammenstellung v. a. den Altschrott, Produktionsschrott wird zumeist paketweise (z. B. Bleche aus der Automobilindustrie) mit bekannten Schrottqualitäten von den Entfallstellen übernommen und an die Stahlherzeuger geliefert. Die Befragung bestätigt die Annahme, dass nur stichprobenweise chemische Analysen durchgeführt werden, Technologien für flächendeckende Analysen insbesondere von Begleitelementen werden heute kaum eingesetzt.

Begleitelemente Durch vermehrten Einsatz von Schrott im Elektrolichtbogenöfen kommt es, je nach eingesetzter

Schrottqualität, zu erhöhten Mengen an Stahlbegleitelementen in den finalen Produkten. Die Auswirkungen der Begleitelemente auf die Leistungsfähigkeit und Anwendungsmöglichkeit moderner Stahlegierungen durch vermehrten Schrotteinsatz sind noch nicht umfassend untersucht. Es sind in Normen zwar maximal zulässige Grenzwerte für diese Elemente festgelegt, es existieren aber keine detaillierten und umfangreichen Untersuchungen zu deren maximalen möglichen Grenzgehalten.

Zu den diesbezüglichen Anforderungen wurden Stahlherzeuger befragt. Dabei wurde klar, dass vor allem die auch im Materialflussmodell betrachteten Elemente (Cu, Cr, Mo, Ni und Sn) jene mit der größten Bedeutung sind. Diese Elemente sind auch jene, die über Schrottfractionen (betrachtet wurden E3 und E6/E8) großteils über dem erforderlichen Grenzwert eingetragen werden.

Im Edeltahlbereich sind es von den genannten Cu und Sn, wobei auch As eine Herausforderung darstellt.

Technische und digitale Innovationen Grundsätzlich sieht sich der Schrotthandel gefordert, eine bessere Schrott-Sortierung zu gewährleisten. Diese muss allerdings bereits bei den Entfallstellen mit richtig bezeichneten Sortier-Behältern beginnen. Sensorgestützte Sortierung (z. B. Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS), Röntgenfluoreszenz (XRF)) ist eine Technologie, deren Durchsatz und Geschwindigkeit heute noch zu begrenzt ist. Für die Schrottmengen ist eine Förderband-Geschwindigkeit von 3 m pro Sekunde erforderlich. Auch robotergestützte Sortierung ist ein Forschungsthema (Flexrobotertechnik). Eine weitere Möglichkeit wäre es, Umschmelzwerke zu betreiben (Induktionsofen + Pelletierung), um genau definierte Stahlqualitäten

liefern zu können. Diese wären besonders für metallhaltige Stäube und (Schleif-)Metallschlämme eine Option. Induktionsöfen könnten als Energiespeicher über günstigen Strom betrieben werden, bzw. könnte sich die Wirtschaftlichkeit über steigende CO₂-Preise für die (Primär-)Stahlerzeugung ergeben.

Die Oberflächen-Analyse-Methode LIBS ist laut *Anlagenbauern* Stand der Technik für Shredderschrott, wird allerdings noch nicht industriell eingesetzt. Physikalische Trennmethode haben ihre Grenzen erreicht, insbesondere für Flachstahl, der einen großen Anteil der in Österreich erzeugten Stahlprodukte ausmacht. Ein Potenzial für Metallrückführung wird auch in den Nebenprodukten Stäube und Schlacken gesehen (200–300 kt/a in AT). Für die Anlagenbauer ist noch nicht klar, wer die Schrottaufbereitung übernehmen wird: Schrotthandel oder Stahlerzeuger? In den USA gibt es einen Trend, dass Stahlerzeuger die Schrottlieferanten in die eigenen Unternehmen integrieren. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Anforderungen an die Begleitelemente (v. a. Kupfer, Nickel, Chrom, Molybdän) des Schrotts je nach Produktbereich (Schiene, Automotive etc.) erfordert die Sortierung mit Oberflächenmethoden eine entsprechende Shredderung für Vereinzelung mit ausreichend geringer Stückgröße. Blei, Zinn und Arsen sind für die Stahlqualität nicht kritisch, weil sie im EAF ohnehin verdampfen (entsprechende Abluftfilter notwendig).

Stahlerzeuger sehen in der Förder-technik und Stückigkeit die Hauptanforderungen bei der Sortierung mit LIBS, XRF und XRD (bzw. Kombination LIBS und XRF). V. a. der Mengen-

strom ist noch ein Problem, insbesondere wenn auch Roboter zum Einsatz kommen müssen, um große E3-Einzel-schrottstücke (rund 2 t) auszusortieren. Das italienische Unternehmen Danieli betreibt in Italien eine Versuchs-Anlage für Sortierung von Fraktion mit Cu < 0,1 % und > 0,1 % mittels „PGNAA“ (Prompt Gamma Neutron Activation Analysis, siehe auch EC 2013). Es wird festgehalten, dass die vorhandenen Schrottklassen (Bandbreiten) zu grob für die Schrottcharakterisierung sind, vor allem im Edelstahlbereich.

Abschließend wurden die Stakeholder um eine Einschätzung zu *nicht-technologischen Maßnahmen* zur Erhöhung der Stahlrecycling-Rate gebeten. Die Ergebnisse sind im Folgenden (Tab. 4) zusammengefasst.

3.2 Einfluss eines vermehrten Schrotteinsatzes auf metallurgische Prozesse und werkstoffliche Produkteigenschaften

Aufgrund unterschiedlicher Anwendungsfälle und Produktionsrouten bergen Begleitelemente verschiedene Problematiken, welche in weiterer Folge exemplarisch behandelt werden.

3.2.1 Kupfer

Besondere Relevanz unter den Begleitelementen hat Kupfer. Als Legierungselement findet dieses bis auf wenige Ausnahmen (z. B. wetterfester Baustahl) keine Anwendung. Vor allem Automobilshredder enthält teils beachtliche Mengen Kupfer von 0,2 m% und mehr mit steigender Tendenz, ausgelöst durch die Elektromobilität. Die beste Möglichkeit zur Entfernung die-

ses Begleitelements ist die sorgfältige Sortierung des Schrotts. Aufgrund des edlen Charakters von Kupfer ist dieses mittels Oxidation nicht aus dem flüssigen Stahl entfernbar. Wegen des niedrigen Dampfdrucks ist Kupfer mittels Vakuumbehandlung nur schlecht entfernbar und erfordert dabei lange Behandlungszeiten. Eine gute Ausbeute ist zwar beim Vakuumumschmelzen erreichbar, dieses Verfahren ist aber nur bei besonderen Qualitäten wirtschaftlich nutzbar. Weitere theoretische Möglichkeiten sind die Entfernung des Kupfers als Sulfid (Katsutoshi Ono et al. 1995) oder als Chlorid (Sasabe et al. 1996). Hierbei handelt es sich jedoch entweder um theoretische, thermodynamische Möglichkeiten oder Laborversuche.

Kupfer gilt als primärer Auslöser der Heiß- und Warmrissigkeit beim Warmwalzen, Schmieden oder Gießen, was es zu einem schädlichen Begleitelement in Stahl macht (Bell et al. 2006).

3.2.2 Molybdän

Das Refraktärmetall Molybdän ist ein Element, welches unter anderem Einsatzstählen zulegiert wird, in vielen anderen un- und niedriglegierten Stahlgüten jedoch als unerwünschtes Begleitelement gilt. Molybdän ist wegen seines edlen Charakters nicht oxidativ entfernbar und verdampft nicht aus dem Stahlbad. Für dieses Element sind zurzeit auch keine theoretischen Möglichkeiten zur Entfernung bekannt, sodass bei hohen Gehalten einzig das Verdünnen als Möglichkeit zur Grenzwerteinhaltung verfügbar ist.

Tab. 4 Nicht-technologische Maßnahmen zur Erhöhung des Stahlrecyclings (einschließlich einer Einschätzung ihrer Wirksamkeit)

Maßnahme	Geeignet	Überwiegend geeignet	Eher nicht geeignet	Nicht geeignet
Entwicklung eines Anreizsystems, um die Lebensdauer der Produkte zu erhöhen (inkl. Einführung eines Kennzeichnungssystems)	0	I	II	II
Einführen von Mindestanforderungen in Bezug auf die Demontage-Fähigkeit und Separierung von Produkten	I	III	0	I
Neue Geschäftsmodelle für Stahlerzeuger (z. B. leasen statt besitzen) bzw. für Schrottaufbereiter (z. B. Demontage/Rückbau in Kooperation mit Automobilindustrie, Elektrogeräteindustrie)	I	II	I	I
Schließen gesetzlicher Lücken und verbesserte Registrierung- und Abmeldemechanismen zur Vermeidung illegaler Ausfuhren von Altfahrzeugen – (z. B. Autoverkauf ohne Pickerl nicht mehr möglich)	III	I	0	0
Kommunikations-Plattformen entlang der Wertschöpfungsketten (SchrottEntfallstelle – Aufbereiter – Stahlerzeuger)	III	II	0	0
Entwicklung von Recycling-Netzwerken zum gemeinsamen effizienteren Vorantreiben von Innovationen im Stahlrecycling	III	II	0	0

Tab. 5 Herstellroute ausgewählter Stahlgüten und Entfernbarkeit von Begleitelementen in metallurgischen Aggregaten

	Herstellroute											
	Aufbereitungsschritt		Primär			Sekundärmetallurgie			Vergießen		Umschmelzen	
	Primär (Erz)	Schrott	Hochofen	LD	EAF	Pfannenofen	RH	VOD	Strangguss	Blockguss	VAR	
Baustahl		X			X	X			X			
Elektroband	X	X	X	X		X	X		X			
Tiefziehgüten	X	X	X	X		X	X		X			
Röhrenstahl	X	X	X	X		X	X		X			
Einsatzstahl	X	X	X	X		X	X		X			
Stahl für Energiemaschinen		X			X	X		X		X	X	
	<i>Entfernung von Begleitelementen</i>											
Kupfer	0	÷	–	–	–	~		÷	÷	<>	<>	+
Molybdän	0	–	–	–	–	–		–	–	<>	<>	–
Zinn	0	÷	–	÷	÷	~		–	–	<>	<>	÷
Chrom	÷	÷	÷	+	+	+		–	–	<>	<>	÷
Arsen	÷	÷	–	–	–	~		+	+	<>	<>	+
Nickel	0	÷	–	–	–	–		–	–	<>	<>	–
Blei	0	÷	–	–	–	–		+	+	<>	<>	+
Phosphor	÷	–	–	+	+	–		–	–	<>	<>	–

LD Linz-Donawitz-Konverter, *EAF* Elektrolichtbogenofen, *RH* Ruhrstahl-Heraeus-Verfahren, *VOD* Vacuum Oxygen Decarburization, *VAR* Vacuum Arc Remelting
+ Gute Entfernbarkeit, ÷ Schlechte Entfernbarkeit, – Keine Entfernbarkeit, ~ thermodynamisch theoretisch mögliche Entfernbarkeit, <> Bei Vergießen keine Änderung der Chemie möglich, 0 Anteil zu gering für Relevanz

3.2.3 Zinn, Arsen und Antimon

Zinn verhält sich ähnlich wie Molybdän. Obwohl es einen niedrigen Schmelzpunkt hat, besitzt es das größte Temperaturintervall für den Flüssigbereich von Metallen und ist daher durch Vakuumbehandlung nicht entfernbar. Trotz der thermodynamischen Umstände kann Zinn jedoch teilweise im Brennfleck des Elektrolichtbogenofens oder LD-Konverters entfernt werden und gelangt als Staub in das Abgas. Wie beim Kupfer existieren auch hier theoretische Möglichkeiten, um dieses Element zu entfernen, beispielsweise als Sulfid (Sasaki et al. 2016), Chlorid (Sasabe et al. 1996) oder intermetallische Phase Ca₂Sn (Iron and Steel Society 1997).

3.2.4 Nickel und Blei

Nickel ist ein edles Metall, das sich wie Molybdän nicht aus dem Stahlbad entfernen lässt. Um hier keine Grenzwerte zu überschreiten, muss nickelhaltiger Schrott sorgfältig von anderen Schrotten getrennt werden.

Blei ist ein Element, das praktisch nicht löslich in Eisen ist. Blei ist zwar edler als Eisen, lässt sich aber gut über Vakuumbehandlung entfernen. Hier ergibt sich aber die Problematik für niedrige Qualitäten, wie Baustahl, die nicht mittels Vakuums raffiniert wer-

den und daher diese Verunreinigung nicht abscheidbar ist. Blei kann zwar theoretisch als feindisperse Metalltropfen in der Schlacke oder als Bleidampf beziehungsweise Bleioxidstaub im Konverter und Lichtbogenofen ausgetragen werden, die dafür notwendige Prozessführung wird aber zurzeit nicht angewendet.

3.2.5 Übersicht

Da für einige genannte Elemente, beispielsweise Nickel, Kupfer und Molybdän, zurzeit keine Möglichkeit der Abscheidung existiert, besteht hier das Potenzial der Anreicherung dieser im Schrott, wodurch sich die beschriebene Problematik weiter zu verschärfen droht. In Tab. 5 sind die Möglichkeiten zur Abtrennung von relevanten Begleitelementen zusammengefasst.

3.3 Rahmenbedingungen für die Entwicklung eines vermehrten Schrotteinsatzes

Grundsätzlich ist in der abgelaufenen Dekade eine relative konstante Nachfrage in der Rohstahl-Menge in Österreich beobachtbar, bei gleichzeitig steigendem Schrottaufkommen unterschiedlichster Qualitäten, welche überwiegend exportiert werden, beispielsweise in die Türkei (WSA 2022). Gleichzeitig stagnieren die CO₂-Emissionen des ös-

terreichischen Stahlsektors auf einem hohen Niveau (UNFCCC 2022) und die Wertschöpfung steigt relativ stark an (Eurostat 2022). Dies weist zwar auf eine relative Entkoppelung hin, das Emissions-Niveau und die absehbare Entwicklung sind letztlich jedoch nicht kompatibel mit dem verfügbaren THG-Budget (Meyer und Steininger 2017). Grundsätzlich hat sich im europäischen Kontext der technologische Dekarbonisierungsweg über Nutzung von Wasserstoff und Ersatz von Koks in der Primärproduktion von Roheisen herauskristallisiert. Auch dieser Energieträger ist mit unterschiedlichen Knappheiten verbunden. Der Weg über grüne Wasserstoffbereitstellung (Elektrolyse) begrenzt sich deutlich durch inländisch verfügbare erneuerbare Strompotenziale und steht im Wettbewerb mit steigendem Strombedarf in anderen Bereichen (nicht metallurgische und verarbeitende Industrie und Gewerbe, Mobilität, Raumwärme) (NEFI 2022). Um Blauen Wasserstoff (Dampfreformierung) durch Spaltprozesse von konventionellem Erdgas klimaneutral herzustellen, ist die Nutzung von Abscheidungs- und langfristigen Speichertechnologien (CCUS) notwendig, deren Potenziale jedoch auch ihre Grenzen aufweisen. Als dritte Option bietet sich türkiser Wasserstoff (Pyrolyse) an, welcher jedoch mit festem Kohlenstoff als Nebenprodukt auch nur begrenzte Senken z. B. in

der Landwirtschaft oder in Baumaterialien aufweist (CCCA 2022).

Eine Kombination aus diesen Primärproduktionsvarianten kann wirtschaftlich darstellbar sein (CCCA 2022), weil durch diese Kombination unterschiedliche Knappheiten und Barrieren abgemildert werden. Um Emissionen aber deutlich und rasch zu senken, ergeben sich durch die geringeren Vorlauf- und industriellen Skalierungszeiten durch verstärkte Sekundärproduktion von Rohstahl einige Fragestellungen, wie genannten Knappheiten begegnet werden kann. Einerseits kann beim Produkt-Design für maßgeschneiderte hochqualitative und langlebige Stahlanwendungen angesetzt werden, das auch „Dismantling“-Kriterien und Standards bei Verunreinigungen berücksichtigt und somit das Sammeln, Sortieren und Reinigen von Stahlschrottströmen erleichtert. Zudem ergibt die mit potenziell ~62% hergeleitete Einsparung von Primärenergie durch Schrotteinsatz bei gleicher Nachfrage eine direkte Emissionseinsparung in Österreich von rund 1,7 t CO₂/t Rohstahl. Indirekt können dadurch weitere Emissionseinsparungen gelingen, durch Ermöglichung der Elektrifizierung anderer Sektoren (Mobilität, Raumwärme). Inwiefern der durch Schrotteinsatz reduzierte Energie-Importbedarf (fossile Energie, aber auch erneuerbarer Strom, Wasserstoff) auch THG-Einsparungen außerhalb Österreichs ermöglicht, hängt von einer Vielzahl von Entwicklungen ab (z. B. überwiegt die Attraktivität innovativer Technologien und grüner Märkte auch außerhalb der EU oder verlagern sich Emissionen beispielsweise durch geringere Preise für fossile Energie in EU-Drittländer mit relativ weniger ambitionierten Klimapolitiken). Dass Stahlschrotte letztlich aufgrund der darin enthaltenen Energie wertvoll sind, wird durch die derzeit beobachtbare dynamische Entwicklung vieler Mitbewerber im Schrott- und Recyclingsektor unterstrichen, wobei manche Stahlerzeuger bereits mit der Übernahme und vertikalen Integration von Schrottaufbereitern beginnen. Potenzielle Spillovers können in einem solchen wettbewerblich-orientierten Umfeld entstehen.

Die Umstrukturierung von langen komplexen Wertschöpfungsketten geht auch mit veränderten Risikoprofilen einher. Auf Firmenebene stellt sich die Frage der optimalen Kombination aus unterschiedlich gestaltbaren

klimaneutralen Primärrouten der Rohstahlerzeugung mit der Sekundärroute. Stahlschrotte sind prinzipiell qualitativ heterogener als Energieträger wie Strom, Erdgas und Wasserstoff. Letztere sind jedoch bedingt lagerfähig und hochgradig leitungsgebunden. Die Kombination mehrerer Entwicklungsoptionen ermöglicht also nicht nur ein Management von unterschiedlichen Knappheiten, sondern im Falle unvorhersehbarer Events auch die Diversifikation der bekannten Risikokomponenten. Umgekehrt erhöht sich jedoch die Komplexität der Zusammensetzung von Betriebs- und Kapitalkosten aller verfügbaren Optionen sowie von zeitlichen Abfolgen bei technologischen Umstellungen auf Basis abgeschätzter Technologiereife-Entwicklungen. Auf politisch-gesellschaftlicher Ebene ist die Akzeptanz der Schrottverwendung (Kreislaufwirtschaft) gegenüber Infrastrukturmaßnahmen im Energiebereich (Leitungen, Windkraft etc.) hypothetisch höher einzuschätzen.

Es stellt sich letztlich die Frage nach politischen Rahmenbedingungen und Instrumenten zur Erhöhung des Stahlschrotteinsatzes. Nicht-marktliche Instrumente umfassen beispielsweise verpflichtende Schrottanteile, denen vorangehend eine Beleuchtung von aktuellen Standardisierungen und Sicherheits-Kriterien bei Stahlgütern durch Grundlagenforschung stehen müsste. Weitere nicht-marktliche Instrumente zielen auf das Labelling von Stahlprodukten zur Etablierung grüner Märkte ab, die nicht nur nachfrageseitig Attraktivität erhöhen, sondern auch bei der Akquise neuer Mitarbeiter:Innen, wobei Ausbildungs- und Qualifizierungsmaßnahmen am Bedarf künftiger Technologieanbieter auszurichten sind. Unter marktliche Instrumente fallen Subventionen für die Schrottaufbereitung als Anschlag mit klar zu begrenzenden zeitlichen Rahmen, denn positive externe Effekte sind hier argumentierbar (Spillovers), doch durch das Ausloten einer Gegenfinanzierung beschränkt. Der aktuell zentrale Treiber innerhalb der marktlichen Instrumente für die Schrottaufbereitung stellt der europäische Emissionshandel EU ETS dar. Von manchen Akteuren werden Credits für erhöhten Schrotteinsatz angedacht, die mit dem EU ETS gekoppelt werden sollen. Eine Aufweichung des Markt-Caps ist aber jedenfalls zu vermeiden. Auch Differenzkontrakte werden als marktliches Instrument genannt, um Schrott-

verwendung gegen fluktuierende Preise abzusichern, sowie eine Berücksichtigung des Schrottmarktes im kommenden Grenzausgleichsmechanismus der EU, um die Folgen unkoordinierter globaler Politiken abzufedern.

4 Schlussfolgerungen

Stahlschrott ist ein bedeutender Sekundärrohstoff in der Stahlproduktion und kann wesentlich zu einer klimaneutralen Stahlindustrie beitragen. Für eine optimierte und nachhaltige Nutzung des Sekundärrohstoffs Stahlschrott zur Herstellung hochwertiger Stahlprodukte sind umfassende Kenntnisse über die verfügbaren Schrottqualitäten sowohl für das Recyclingverfahren als auch für das zu erzeugende Produkt wesentlich. In Anbetracht der hohen Anforderungen an Stahlprodukte und deren Funktionalität nimmt die Komplexität der Stahlprodukte ständig zu, sodass der Anteil der für das Stahlrecycling unerwünschten Materialkombinationen und Begleitelemente im Schrott steigt. Daraus ergeben sich sowohl aus logistischer als auch aus technischer Sicht große Herausforderungen für die Aufbereitung und Rückgewinnung der Materialien. Diese Herausforderung wirkt sich auf die gesamte Wertschöpfungskette aus. Nur durch die Einbeziehung der gesamten Prozesskette, angefangen bei der Schrottindustrie (Schrottaufbereitung) bis hin zu den Stahlproduzenten ist es möglich, die notwendigen Innovationen zur Steigerung des Stahlrecyclings sinnvoll zu definieren und umzusetzen.

Der Anteil von Altschrott an der gesamten Schrottzusammensetzung nimmt zu. Dieser Schrott ist meist von geringer Reinheit, insbesondere wenn keine Maßnahmen (z. B. möglichst sortenreine Sortierung) ergriffen werden. Schrott mit niedrigem Reinheitsgrad gewinnt daher in Bezug auf die Gesamtschrottzusammensetzung an Bedeutung. Die potenzielle Schrottquote (Schrotteinsatz relativ zur Rohstahlproduktion) für die Rohstahlproduktion in Europa wird im Jahr 2030 bis zu 67% (75% bis 2050) erreichen, was bei Berücksichtigung des gemeinsamen Wirtschaftsraums auch für Österreich eine entsprechende Schrottverfügbarkeit bedeutet. Unter dem Gesichtspunkt der Kreislaufwirtschaft scheint dies eine sehr gute Nachricht zu sein. Gegenwärtig wird dieses Potenzial jedoch nicht ausgeschöpft, da kein Altschrott aus

anderen EU-Ländern importiert und eingesetzt wird. Wenn Schrott weiterhin so behandelt wird, wie es derzeit üblich ist (z. B. wenig Sortierung), werden die Qualitätsanforderungen an Rohstahl in Österreich nur mit entsprechend niedriger Schrottrate erfüllt werden können und auch in Zukunft mehr als 60 % des Rohstahls aus Primärquellen erzeugt werden müssen, um die qualitativen (Reinheits-)Anforderungen an Rohstahl zu erfüllen.

Aus werkstofflicher Sicht lässt sich schlussfolgern, dass die betrachteten Begleitelemente negative wie auch positive Auswirkungen auf die Stahleigenschaften haben können. Deren finale Wirkung hängt stark mit der Legierungszusammensetzung und dem Herstellungsprozess zusammen. Aufgrund dessen lassen sich deren Einflüsse auf spezifische Stahlgüten ohne weitere Untersuchungen nicht eindeutig beschreiben.

All diese technologischen, organisatorischen und regulatorischen Fragen zur erhöhten Stahlschrottverwendung ergeben ein breites Feld für weitere Forschungsvorhaben. Dazu zählt auch eine Abschätzung der direkten und indirekten volkswirtschaftlichen Effekte des erhöhten Schrotteinsatzes mittels Szenarien-Analyse. Ein „optimales“ Verhältnis von Primär- zu Sekundärrohstoffen ist nicht nur abhängig von Schrottver-

fügarkeiten (nach Güteklassen) und den nachgefragten Endproduktqualitäten, sondern auch vom nichtlinearen Zusammenspiel der technologischen Möglichkeiten in der Primärproduktion. Diese sind wiederum abhängig von internationalen Entwicklungen auf zurzeit immens umwälzenden Energiemärkten und den Dynamiken in anderen energienachfragenden Bereichen. Als Arbeitshypothese für künftige Forschungsvorhaben wird die klimaneutrale Entwicklung im Stahlbereich durch verstärkte Schrottverwendung nicht nur insgesamt effizienter und damit günstiger, sondern auch widerstandsfähiger, da Lieferketten diversifizierter gestaltet werden können.

Danksagung Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort und die Nationalstiftung für Forschung, Technologie und Entwicklung sowie die Christian Doppler Forschungsgesellschaft. Weiters wurde die Studie im Rahmen der FTI-Initiative Kreislaufwirtschaft gefördert. Die FTI-Initiative Kreislaufwirtschaft ist eine Forschungs-, Technologie- und Innovationsinitiative des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität Innovation und Technologie (BMK). Es wird im Auftrag des BMK von der Österreichischen For-

schungsförderungsgesellschaft (FFG) abgewickelt.

Funding Open access funding provided by TU Wien (TUW).

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>. ■

Literatur

- AEA (2022): Stromstrategie 2040: Österreichs Weg in eine klimaneutrale Energiezukunft. Verfügbar unter: <https://oesterreichsenergie.at/downloads/publikationsdatenbank/detailseite/stromstrategie-2040-oesterreichs-weg-in-eine-klimaneutrale-energiezukunft>. Zugegriffen: 15.06.2022
- Baccini, P., & Brunner, P. H. (1991): Metabolism of the Anthroposphere. In *Metabolism of the Anthroposphere*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-02693-9>
- Bell, S., Davis, B., Javid, A., & Essadiq, E. (2006): Final Report on Effect of Impurities in Steel.
- Broadbent, C. (2016): Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(11). <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1081-1>
- CCCA (2022): Untersuchung der nachhaltigen Verwertung von Kohlenstoff aus der Methanpyrolyse. Projektbericht ans BMK.
- Cullen, J. M., Allwood, J. M., & Bambach, M. D. (2012): Mapping the Global Flow of Steel: From Steelmaking to End-Use Goods. *Environmental Science and Technology*, 46(24). <https://doi.org/10.1021/es302433p>
- Daehn, K. E., Cabrera Serrenho, A., & Allwood, J. M. (2017): How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling? *Environmental Science and Technology*, 51(11). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00997>
- 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: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 50(3). <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01537-9>
- Daigo, I., Fujimura, L., Hayashi, H., Yamasue, E., Ohta, S., Huy, T. D., & Goto, Y. (2017): Quantifying the total amounts of tramp elements associated with carbon steel production in Japan. *ISIJ International*, 57(2), 388–393. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-500>
- Daigo, I., Tajima, K., Hayashi, H., Panasiuk, D., Takeyama, K., Ono, H., Kobayashi, Y., Nakajima, K., & Hoshino, T. (2021): Potential influences of impurities on properties of recycled carbon steel. *ISIJ International*, 61(1), 498–505. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-377>
- Dworak, S., & Fellner, J. (2021): Steel Scrap Generation in the EU-28 since 1946—Sources and Composition. *Resources, Conservation and Recycling*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105692>
- 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*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106072>
- EC (2013): On-line bulk composition analysis of steel scrap using PGNA (SCRAP PROBE). <https://doi.org/10.2777/43463>
- Eurofer (2021): European Steel in Figures 2021. *European Ferrous Recovery and Recycling* (Ed.) (2007): EU-27 steel scrap specification.
- Eurostat (2022): Value added at factor cost: Annual detailed enterprise statistics for industry (NACE Rev. 2, B–E) [sbs_na_ind_r2]. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/eurostat/>. Zugegriffen: 15.06.2022
- Hatayama, H., Daigo, I., Matsuno, Y., & Adachi, Y. (2010): Outlook of the world steel cycle based on the stock and flow dynamics. *Environmental Science and Technology*, 44(16). <https://doi.org/10.1021/es100044n>
- Igarashi, Y., Daigo, I., Matsuno, Y., & Adachi, Y. (2007): Estimation of the change in quality of domestic steel production affected by steel scrap exports. *ISIJ International*, 47(5). <https://doi.org/10.2355/isijinternational.47.753>
- Iron and Steel Society (1997): 54th Electric Furnace Conference proceedings: Dallas Meeting, December 9–12, 1996. Electric Furnace Conference, 54, 1996, Dallas, Tex.
- Katsutoshi O., Ichise, E., Suzuki, R. O., & Hidan, T. (1995): Elimination of copper from the molten steel by NH₃ blowing under reduced

pressure. *Steel Research Process Metallurgy*. <https://doi.org/10.1002/srin.199501140>

Linnhoff, B., & Hindmarsh, E. (1983): The pinch design method for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(83\)80185-7](https://doi.org/10.1016/0009-2509(83)80185-7)

López, C., Pea, C., & Muoz, E. (2020): Impact of the Secondary Steel Circular Economy Model on Resource Use and the Environmental Impact of Steel Production in Chile. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 503(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012024>

Meyer, L., & Steininger, K. (2017): Das Treibhausgas-Budget für Österreich. In *Wissenschaftlicher Bericht Nr. 72-2017*.

NEFI (2022): Projekt-Zwischenergebnisse. New energy for industry. Verfügbar unter: https://www.nefi.at/files/media/Pdfs/NEFI_Szenarien_V2.pdf. Zugegriffen: 15.06.2022

Sasabe, M., Harada, E., & Yamashita, S. (1996): Removal of copper from carbon saturated molten iron by using FeCl₂. *Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 82(2). https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.82.2_129

Sasaki, N., Uchida, Y. I., Miki, Y. J., & Matsuno, H. (2016): Fundamental study of Sn removal from hot metal by NH₃ gas blowing. *Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 102(1). <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2015-056>

UNFCCC (2022): GHG Inventory Data: Contribution of sectors and gases. United Nations Framework Convention on Climate Change. Verfügbar unter: <https://www4.unfccc.int/sites/br-di/Pages/GHGInventory.aspx>. Zugegriffen: 15.06.2022

WKO (2019): Im Wettbewerb um die Zukunft Klimapolitische Perspektiven für den Beitrag der österreichischen Industrie zur Treibhausgas-

neutralität. Verfügbar unter: <https://www.wko.at/branchen/industrie/zukunft-policy-paper.pdf>. Zugegriffen: 15.06.2022

WSA (2020): Steel Statistical Yearbook 2020. In *Steel Statistical Yearbook 2020*. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Steel-Statistical-Yearbook-2020-concise-version.pdf>

WSA (2022): World Steel Association Statistics. Verfügbar unter: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/>. Zugegriffen: 15.06.2022

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.