

IRONER – Potenziale für innovatives und nachhaltiges Recycling von Stahl

G. Hackl, M. Beermann, J. Rieger,
M. Häuselmann, J. Schenk,
S. K. Michelic, J. Cejka, R. Schnitzer,
A. Sakic, S. Dworak,
K. Steiniger, J. Mayer

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

1/2023

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

IRONER – Potenziale für innovatives und nachhaltiges Recycling von Stahl

Dipl.-Ing. Dr. Gerhard Hackl
The Austrian Society for Metallurgy and Materials (ASMET)

DI Martin Beermann
JOANNEUM RESEARCH – LIFE Zentrum für Klima, Energie und Gesellschaft

Dipl.-Ing. Dr. mont. Johannes Rieger, Dipl.-Ing. Monika Häuselmann
K1-MET GmbH

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Johannes Schenk,
assoz.Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Susanne Michelic, Dipl.-Ing. Julian Cejka
Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Eisen- und Stahlmetallurgie

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Ronald Schnitzer, Dipl.-Ing. Amin Sakic
Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Stahldesign

DI Dr. techn. Sabine Dworak,
Technische Universität Wien, Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement

Univ.-Prof. Mag. Dr. Karl Steininger, Dr. Jakob Mayer
Universität Graz, Wegener Center für Klima und Globalen Wandel

Leoben, Oktober 2022

Ein Projektbericht im Rahmen der



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Das 21. Jahrhundert stellt die Menschheit vor enorme Herausforderungen. Klimakrise, Umweltverschmutzung, die Zerstörung von Ökosystemen und der damit einhergehende Biodiversitätsverlust sowie die zunehmende Verknappung endlicher Ressourcen zeigen die Grenzen linearen Wirtschaftens auf und machen ein Umdenken notwendig. Nachhaltigen Wirtschaftskonzepten, wie jenen der Kreislaufwirtschaft oder der Bioökonomie, wird zur Lösung der genannten Herausforderungen eine entscheidende Rolle zugesprochen.

In einer kreislauforientierten Wirtschaft etwa werden Rohstoffe sowie die daraus produzierten Güter möglichst ressourcenschonend hergestellt, die Lebensdauer der Erzeugnisse prolongiert sowie deren Nutzung intensiviert, um so Energie- und Ressourcenverbrauch, Abfallaufkommen und Schadstoffausstoß auf ein Minimum zu reduzieren. Erst wenn Produkte nicht mehr anderweitige Verwendung finden, werden diese dem Abfallstrom zugeführt, um daraus durch Recycling Sekundärrohstoffe zu gewinnen. Jene Abfälle, die sich – z.B. aufgrund ihres Schadstoffgehalts – nicht zur stofflichen Verwertung eignen, können unter anderem energetisch genutzt werden.

In Ergänzung dazu steht die Bioökonomie – ein Konzept, das in möglichst allen Bereichen und Anwendungen fossile Ressourcen durch nachwachsende Rohstoffe ersetzen soll. Aber auch biogene Ressourcen sind nicht unbegrenzt verfügbar. Daher ist es sowohl aus ökologischen als auch aus ökonomischen Gründen notwendig, Biomasse möglichst vollständig zu verwerten, beziehungsweise Konzepte zu entwickeln, die eine ressourceneffiziente Nutzung berücksichtigen und höhere Wertschöpfung erzielen. Zugleich soll auch hier eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft unterstützt werden, welche – neben der kaskadischen Nutzung – auf die Rückführung von biogenem Material in den Produktionskreislauf, die Verwertung von Reststoffen und eine vollständige Schließung des Kohlenstoffkreislaufs abzielt.

Für eine Transformation unseres linearen Wirtschaftssystems hin zur Kreislaufwirtschaft sind neue technologische Ansätze, innovative Geschäftsmodelle, systemisches interdisziplinäres Denken, enge Vernetzung der Akteure und verbessertes Informationsmanagement notwendig.

Um diese Umgestaltung zu unterstützen, fördert das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) gezielt angewandte Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Schwerpunkt Kreislaufwirtschaft, mit dem Ziel Innovationen anzustoßen und die langfristige Wettbewerbsfähigkeit des österreichischen Wirtschaftsstandorts zu stärken.

Der vorliegende Bericht dokumentiert in umfassender Weise die Ergebnisse eines F&E-Projektes, gefördert im Rahmen der FTI Initiative Kreislaufwirtschaft der Sektion Innovation

und Technologie im BMK. Unsere Motivation ist es, kontinuierlich Ergebnisse geförderter Projekte zentral, themenübergreifend und öffentlich zugänglich zu machen. Damit wollen wir einen Anstoß zur Lösung unserer großen gesellschaftlichen Herausforderungen geben und folgen dem Ziel des BMK, unter der Initiative „open4innovation“ (www.open4innovation.at) die Basis für Vernetzung und für die Gestaltung von Neuem zu schaffen.

René ALBERT

Koordinator des FTI-Schwerpunktes Kreislaufwirtschaft

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
(BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	7
2	Abstract	9
3	Ausgangslage	11
4	Projekthalt	14
4.1.	Materialflussanalyse zur Verfügbarkeit von Stahlschrott.....	14
4.1.1.	Methoden und Daten	15
4.1.2.	Szenarien zur Schrottverfügbarkeit	17
4.2.	Ist-Erhebung der vorhandenen Schrottqualitäten und zur Schrotthandling in der österreichischen Stahl- und Schrottindustrie	18
4.3.	Optimierung des Stoffstrommanagements beim Stahlrecycling.....	18
4.4.	Notwendige technische und digitale Innovationen zum erhöhten Stahlrecycling.....	18
4.5.	Auswirkungen eines vermehrten Schrotteinsatzes auf Stahlwerksprozesse und Werkstoffqualitäten	19
4.6.	Volkswirtschaftliche und klimapolitische Einbettung eines vermehrten Schrotteinsatzes...	21
5	Ergebnisse	22
5.1.	Schrottverfügbarkeit in Österreich	22
5.1.1.	Materialflussanalyse zur Verfügbarkeit von Stahlschrott	22
5.1.2.	Ergebnisse aus den Stakeholder-Interviews.....	24
5.2.	Optimierungspotenziale des Stoffstrommanagements beim Stahlrecycling	28
5.2.1.	Datenlücken.....	29
5.2.2.	Monitoring/Aufbereitung.....	30
5.3.	Technische und digitale Innovationen	30
5.4.	Einfluss eines vermehrten Schrotteinsatzes auf metallurgische Prozesse und werkstoffliche Produkteigenschaften	32
5.4.1.	Betrachtung ausgewählter Begleitelemente.....	32
5.4.2.	Auswirkung von Begleitelementen auf das Umwandlungsverhalten	34
5.4.3.	Einfluss auf ausgewählte Stahlgüten	36
5.5.	Rahmenbedingungen für die Entwicklung eines vermehrten Schrotteinsatzes.....	40
6	Schlussfolgerungen	42
7	Ausblick und Empfehlungen	44
8	Verzeichnisse	45
9	Anhang	52
9.1.	Data Management Plan (DMP)	52

1 Kurzfassung

Die europäische Eisen- und Stahlindustrie hat sich den globalen Klimazielen verpflichtet und ist entschlossen, ihre produktionsbedingten CO₂-Emissionen bis 2030 um mindestens 50% gegenüber dem Jahr 1990 zu senken. Stahlschrott ist ein wesentlicher sekundärer Rohstoff in der Stahlproduktion und leistet außerdem einen wertvollen Beitrag zu einer nachhaltigen und CO₂-armen bzw. CO₂-neutralen Stahlindustrie. Das Einschmelzen von Stahlschrott führt im Vergleich zur Stahlerzeugung durch die Primärroute zu einem niedrigeren Ressourcenverbrauch und birgt daher sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Vorteile. Voraussetzungen für die Verwertung von Schrott und damit seine Rückführung in den metallurgischen Prozess sind die Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigem Schrott sowie umfassende Kenntnis hinsichtlich seiner Beschaffenheit. Insbesondere Altschrotte können die geforderten Qualitätskriterien (z.B. Anteile an nichtmetallischen Verunreinigungen oder Nichteisenmetallen) oftmals nicht einhalten. Dies hat einen derzeit hohen Exportanteil und einen damit einhergehenden Ausschluss aus dem Materialkreislauf zur Folge. Durch immer komplexer werdende Produkte (z. B. Elektromobilität) und neue Verbundwerkstoffe wird das Recycling zunehmend anspruchsvoller. Die Auswirkungen betreffen die gesamte Wertschöpfungskette und führen zu Herausforderungen aus logistischer, technischer und metallurgischer Sicht bei der Verwertung und dem Recycling der Materialien.

Vor diesem Hintergrund ist das Projekt IRONER darauf ausgerichtet, Optimierungspotenziale für ein nachhaltiges Stahlrecycling zu identifizieren und einen umfangreichen Katalog offener Fragen und notwendiger Innovationen für ein verstärktes Stahlrecycling zu entwickeln. Das Projekt verfolgt einen möglichst ganzheitlichen und anwendungsnahen Ansatz, der eine modellgestützte Materialflussanalyse und Stakeholder-Befragungen ebenso einschließt wie metallurgische, werkstofftechnische und wirtschaftliche Betrachtungen.

Auf Basis einer Materialflussanalyse für Österreich wird die Verfügbarkeit bestimmter Schrottklassen dem Rohstahlbedarf gegenübergestellt und eruiert, inwieweit das Schrottangebot (Menge und Zusammensetzung) den Bedarf an Rohstahl decken kann. Erkenntnisse aus einer Befragung der österreichischen Stahlindustrie, des Anlagenbaus und des Schrotthandels über die vorhandenen Schrottqualitäten und den Umgang mit Schrott (Schrotthandling) sollen Aufschluss über das tatsächliche Schrottmanagement ermöglichen. Zudem sollen die Erhebungen in Verbindung mit einer Literaturrecherche dazu dienen, Rückschlüsse auf notwendige technische und digitale Innovationen zu ziehen. Eine metallurgische Betrachtung bestehend aus einer Literaturrecherche sowie Berechnungen soll Hinweise darauf geben, welchen Einfluss ausgewählte Begleitelemente auf den Stahlherstellungsprozess und Materialqualitäten ausüben. Die Abschätzung des Nutzens der Kreislaufwirtschaft für Umwelt und Klima bildet ein ergänzendes Element innerhalb der Studie.

In Zukunft wird der Anteil des Altschrotts an der gesamten Schrottzusammensetzung in Österreich zunehmen, wobei dieser ohne entsprechende Maßnahmen, wie z.B. sortenreine Sortierung, in der Regel eine geringe Reinheit aufweist. Bei Beibehaltung der derzeitigen Schrottbehandlung (z.B. keine ausreichende Sortierung) werden die Qualitätsanforderungen an Rohstahl in Österreich nur mit einer entsprechend niedrigen Schrottquote erfüllt werden können. Daraus folgt, dass zukünftig mehr als 60% des Rohstahls aus Primärquellen bereitgestellt werden müssen, um die qualitativen

Anforderungen an die Reinheit von Rohstahl zu erfüllen. Dies entspricht in etwa der derzeit in Österreich erreichten Quote.

In Österreich werden für die Stahlproduktion jährlich rund 1,5 Mio. t Schrott verwendet, wovon 58% durch importierten und 42% durch inländischen Schrott abgedeckt werden. Nach Einschätzung der österreichischen Stakeholder wird der Bedarf an Schrott in den kommenden Jahren steigen, was in erster Linie auf die geplante Technologieumstellung von der Primärproduktion auf Elektrolichtbogenöfen zurückzuführen ist. Der mittelfristige Mehrbedarf beträgt schätzungsweise mindestens 1 Mio. t Schrott pro Jahr. Obwohl dies in etwa der heute aus Österreich exportierten Schrottmenge entspricht, könnten die Mengen in den benötigten Schrottklassen vom Schrotthandel derzeit nicht bereitgestellt werden.

Bisherige Aufbereitungs- und Sortiertechniken stoßen vor allem bei immer komplexer werdenden Produkten an ihre Grenzen und Maßnahmen zur Verbesserung der Schrottsortierung bis zur Erreichung einer möglichst sortenreinen Trennung sind unumgänglich. Der Einsatz innovativer Technologien zur Aufbereitung und Sortierung sowie deren Kombination kann die Schrottqualität und die Sortierreinheit deutlich verbessern und damit die Schrottverfügbarkeit erhöhen. Sensorgestützte Sortierung, automatisierte Demontage von Abfällen sowie die Digitalisierung der Prozesse stellen vielversprechende Ansätze zur Steigerung des Schrotteinsatzes dar. Daher ist es wesentlich, die Weiterentwicklung, Erprobung und Integration von Analyse- und Trenntechniken voranzutreiben, um die im Schrott vorhandenen Verunreinigungen zu identifizieren und sie vor der Beschickung der Öfen wirksam zu entfernen.

Aus metallurgischer Sicht ergeben sich durch den zunehmenden Einsatz von Sekundärrohstoffen und den damit verbundenen Begleitelementen zum einen Modifikationen in der Prozessführung und zum anderen Forschungsbedarf hinsichtlich bereits gut untersuchter Reaktionen und Wechselwirkungen. Begleitelemente können sowohl negative als auch positive Auswirkungen auf die Stahleigenschaften haben, wobei ihre Wirkung stark von der Legierungszusammensetzung und dem Herstellungsverfahren abhängt. Von besonderer Relevanz sind hierbei jene Elemente, die metallurgisch nicht aus der Stahlschmelze entfernt werden können, wie etwa Kupfer, Molybdän oder Zinn. Folglich müssen ihre Auswirkungen auf bestimmte Stahlsorten individuell untersucht und beschrieben werden.

Die Relevanz eines verstärkten Schrotteinsatzes für Klimaschutz und wirtschaftliche Entwicklung wird durch die Knappheit des zur Verfügung stehenden Treibhausgasbudget zur Einhaltung der Pariser Klimaziele sowie dem aktuell limitierten Zugang zu klimafreundlicherem erneuerbarem Energieträger deutlich. Durch das Schmelzen und Recyceln von Schrotten mittels Elektrolichtbogenöfen (100% Schrott) können sowohl rund 80% der Primärenergie als auch rund 80% der CO₂-Emissionen im Vergleich zur integrierten Route eingespart werden. Indirekt können außerdem weitere Emissionseinsparungen durch Ermöglichung der Elektrifizierung anderer Sektoren (z.B. Mobilität) gelingen.

All diese technologischen, organisatorischen und regulatorischen Aspekte eines verstärkten Einsatzes von Stahlschrott bedürfen einer detaillierten und umfassenden Betrachtung und bieten ein breites Feld für weitere Forschungsvorhaben.

2 Abstract

Being committed to the global climate targets, the European iron and steel industry aims to reduce its process-related CO₂ emissions by at least 50% by 2030 compared to 1990 levels. Scrap is an essential secondary raw material in steel production and furthermore contributes significantly to a sustainable and CO₂-lean or CO₂-neutral steel industry. Melting steel scrap leads to lower resource consumption than steel production via the primary route and therefore holds environmental and economic advantages. A prerequisite for recycling scrap and thus its recirculation to the metallurgical process is the availability of high-quality scrap and comprehensive knowledge of its composition. In particular, post-consumer scrap often cannot meet the required quality criteria (e.g., share of non-metallic components or non-ferrous metals). This results in a currently high export rate and an associated exclusion from the material cycle. Due to increasingly complex product designs (e.g., electromobility) and new composite materials, the recycling process is getting increasingly challenging. The effects affect the entire value chain and lead to logistical, technical and metallurgical difficulties in the recovery and recycling of the materials.

In this context, the IRONER project focuses on identifying optimisation potential for sustainable steel recycling and developing a comprehensive catalogue of pending issues and necessary innovations to strengthen steel recycling. The project pursues an application-oriented approach involving a model-based material flow analysis and stakeholder surveys as well as metallurgical, materials technology, and economic assessment.

A material flow analysis for Austria is used to evaluate the availability of certain scrap grades in relation to the crude steel demand. This involves determining the extent to which the scrap supply (quantity and composition) can meet the demand for crude steel production. A survey among the Austrian steel industry, plant manufacturer, and metal recycling companies regarding the existing scrap qualities and the handling of scrap will provide information about the actual scrap management. In addition, conclusions on necessary technical and digital innovations will be drawn from the survey in combination with a literature review.

A metallurgical analysis consisting of a literature review and calculations will provide information on the influence of selected accompanying elements on the steel production process and material qualities. The assessment of the benefits of the circular economy on the environment and climate forms a supplementary element within the study.

The share of post-consumer scrap within the total scrap mix in Austria will increase in the future, whereby without appropriate measures, such as sorting by type, a low degree of purity of the scrap is expected. By maintaining the current scrap treatment (e.g., no sufficient sorting), the quality requirements for crude steel in Austria will only be met with a correspondingly low scrap quota. Without changing the current scrap treatment (e.g., insufficient sorting), the quality requirements for crude steel in Austria can only be met with a correspondingly low scrap quota. This implies that in the future more than 60% of crude steel will have to be provided from primary sources in order to meet the qualitative requirements for the purity of crude steel, which roughly corresponds to the rate currently applied in Austria.

Presently, about 1.5 million tons of scrap are used annually in Austria for steel production, whereby 58% of the scrap is imported and 42% is provided by domestic scrap. It is estimated by Austrian stakeholders that the demand for scrap will increase in the coming years, primarily due to the planned transition from primary production to electric arc furnaces. The medium-term additional demand is estimated to be at least 1 million tons of scrap per year. Although this roughly corresponds to the current amount of scrap exported from Austria, the required scrap grades cannot be provided by the scrap market at present.

The use of innovative technologies for processing and sorting as well as their combination can significantly improve scrap quality and sorting purity and thus increase scrap availability. Sensor-assisted sorting, automated dismantling of scrap as well as the digitalisation of processes represent promising approaches to increasing scrap utilisation. It is therefore vital to progress the further development, testing and integration of analysis and separation techniques in order to identify impurities in the scrap and effectively remove them before charging the furnaces.

From a metallurgical point of view, the increasing use of secondary raw materials and the associated accompanying elements result in changes in process control as well as a need for additional research with regard to already well-studied reactions and interactions. Accompanying elements can have both negative and positive effects on steel properties, and their effect depends strongly on the alloy composition and the manufacturing process. Of particular relevance in this context are those elements that cannot be metallurgically removed from the molten steel, such as copper, molybdenum or tin. Therefore, their effects on specific steel grades need to be studied and described individually.

The significance of increased utilisation of scrap regarding climate protection and economic development is highlighted by the scarcity of the available greenhouse gas budget to meet the Paris climate targets and the currently limited access to more climate-friendly renewable energy sources. Compared to the integrated method, melting and recycling scrap in an electric arc furnace (100% scrap) lowers primary energy demand as well as CO₂ emissions by around 80%. Indirectly, further emission savings can also be achieved by enabling the electrification of other sectors (e.g., mobility).

All these technological, organisational and regulatory aspects of enhanced scrap use require detailed and comprehensive assessment and offer a broad field for further research projects.

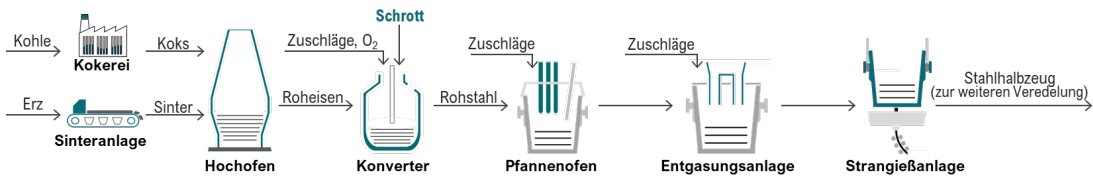
3 Ausgangslage

Die Stahlerzeugung kann im Allgemeinen über zwei Prozesswege erfolgen, wobei zwischen der Primärroute (Abbildung 1) und der Sekundärroute (Abbildung 2) unterschieden werden muss. Die primäre Route kann über einen integrierten Prozess (Sinteranlage-Kokerei-Hochofen-Konverter) erfolgen, bei dem Eisenerz im Hochofen geschmolzen und zu Roheisen reduziert wird. Anschließend wird es im nachgeschalteten Konverter (z.B. Linz-Donawitz-Verfahren, kurz LD-Verfahren) zu Rohstahl weiterverarbeitet. Stahlschrott wird im LD-Verfahren sowohl als Eisenträger als auch aus prozesstechnischen Gründen (Kühlmittel) eingesetzt.

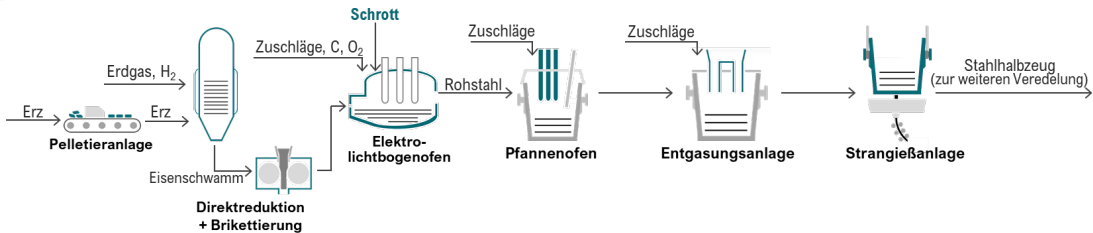
Abbildung 1: Primärroute der Stahlproduktion adaptiert nach (Europäische Kommission, 2013, S.9, S.368)

PRIMÄRROUTE

INTEGRIERTER PROZESSROUTE



DIREKTREDUKTION

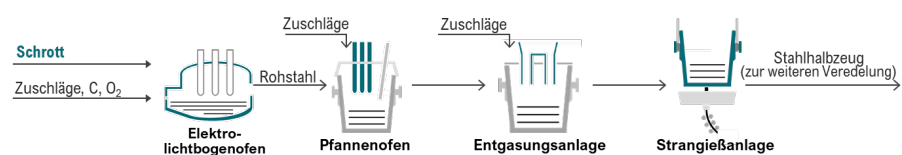


Eine weitere Verfahrensvariante ist die Direktreduktion, bei der pelletiertes Erz mit Erdgas (und/oder Wasserstoff) zu einem Eisenschwamm reduziert wird. Dieser wird zum Teil brikettiert und im Elektrolichtbogenofen (ebenfalls unter Zugabe von Stahlschrott) zu Rohstahl umgewandelt.

Bei der sekundären Route wird Rohstahl in einem Elektrolichtbogenofen durch ein Recycling von Stahlschrott erzeugt.

Abbildung 2: Sekundärroute der Stahlproduktion adaptiert nach (Europäische Kommission, 2013, S.420)

SEKUNDÄRROUTE



Die aktuelle Fertigung von Stählen mittels integrierter Hochofen-Konverter-Route führt zu qualitativ hochwertigen Produkten mit einem geringen Gehalte an Stahlbegleitelementen, nichtmetallischen

Einschlüssen und Verunreinigungen. Auf Basis dieser geringen Gehalte an stahlschädlichen Elementen wurden Hochleistungsstähle mit einer Vielzahl an Legierungsvariationen in den letzten Jahrzehnten entwickelt, die zahlreiche innovative Anwendungen ermöglicht haben. In Österreich wurden 2019 rund 90% des Rohstahls über die integrierte Route Hochofen-Konverter erzeugt. Europaweit lag der Anteil der Primärroute bei ca. 58% (World Steel Association, 2020, S.5).

Europa befindet sich im Übergang zu einer klimaneutralen, wettbewerbsfähigen und kreislauforientierten sowie ressourceneffizienten Wirtschaft und hat sich mit dem Green Deal anspruchsvolle Ziele gesetzt. Die Eisen- und Stahlindustrie ist ein zentraler Teil der europäischen Wirtschaft und muss sich zur Erreichung der Klimaziele und der damit einhergehenden Umstellung auf eine CO₂-neutrale Produktion bis 2050 diversen Herausforderungen stellen. Vor allem durch die Bemühungen zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie zur Erreichung des festgelegten CO₂-Reduktionsziels werden die Anteile der CO₂-ärmeren Primärroute (Direktreduktion-Elektrolichtbogenofen) und der Sekundärroute steigen. Aufgrund der zu erwartenden Zunahme des Schrotteinsatzes ist eine geeignete Schrottqualität entscheidend, um optimale Endproduktqualitäten zu erreichen. Schrottqualität ist definiert durch die Geometrie der Schrottstücke (Form, Abmessungen, Gewicht, Volumen) und durch die materielle (chemische) Zusammensetzung (Anteile an Eisen und Fremdmetallen sowie anorganischen Bestandteilen, wie z.B. Kunststoffe).

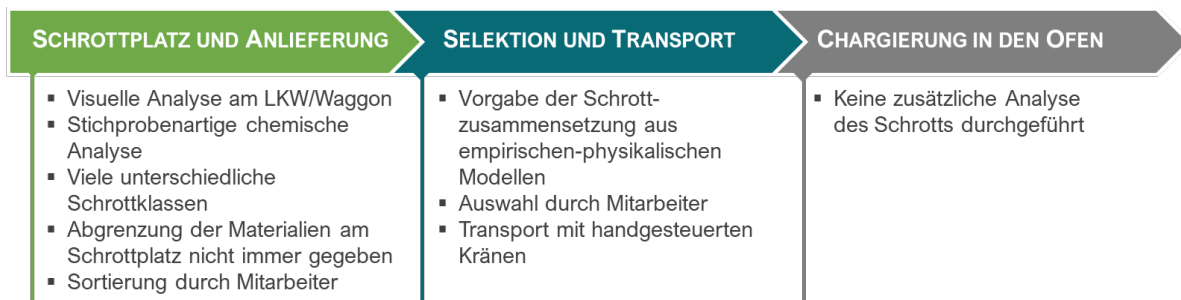
Für unlegierte Kohlenstoffstähle gibt es von der European Ferrous Recovery and Recycling Federation (EFR), einer Unterorganisation der EuRIC (European Recycling Industries' Confederation), eine Qualitätsspezifikation für Stahlschrotte (European Ferrous Recovery and Recycling Foundation, 2007, S.4-7). Folgende Tabelle (Tabelle 1) zeigt einen Auszug der Schrottklassenspezifikation. Wesentliche Klassenmerkmale beinhalten Dimensionen, Dichte sowie Nichteisenmetallanteile.

Tabelle 1: Schrottklassen in der EU gemäß einer Spezifikation der EFR nach (European Ferrous Recovery and Recycling Foundation, 2007, S.4-7)

Kategorie	Spezifikation (Klasse)	Anteil an Nichteisenmetallen [%]			
		Cu	Sn	Cr, Ni, Mo	S
Altschrott	E3	≤ 0,25	≤ 0,01	Σ ≤ 0,25	
	E1	≤ 0,40	≤ 0,02	Σ ≤ 0,30	
Produktionsschrott (geringe Begleitelemente, unbeschichtet)	E2	Σ ≤ 0,30			
	E8	Σ ≤ 0,30			
	E6	Σ ≤ 0,30			
Geschredderter Schrott	E40	≤ 0,25	≤ 0,02		
Stahlspäne	E5 (H/M)	≤ 0,40	≤ 0,03	Σ ≤ 1,00	≤ 0,10
Hochverunreinigter Schrott	EHRB	≤ 0,45	≤ 0,03	Σ ≤ 0,35	
	EHRM	≤ 0,40	≤ 0,03	Σ ≤ 1,00	
Zerkleinerter Schrott aus der Müllverbrennung	E46	≤ 0,50	≤ 0,07		

Folgende Abbildung (Abbildung 3) zeigt den Stand der Technik bei der Schrottverwertung im Stahlwerk. Der erste wesentliche kritische Faktor ist die Heterogenität des angelieferten Schrottes. Aufgrund von Verunreinigungen und des schwankenden Gehalts an Fremdmetallen ist die Analyse nach dem derzeitigen Stand der Technik mit Unsicherheiten behaftet. Visuelle Inspektionen sind mit stichprobenartigen chemischen Analysen gekoppelt, die jedoch häufig nicht repräsentativ für die Gesamtheit der gelieferten Schrottcharge sind. Der Schrott wird vor Ort durch Bagger, Greifer und Muldenkipper getrennt gelagert, um eine gewisse Sortentrennung zu erreichen. Basierend auf der zu erzeugenden Stahlgüte wird der Schrottmix zusammengestellt und für die Chargierung in den Schmelzofen (Konverter oder Elektrolichtbogenofen) vorbereitet. Die Auswahl der Schrottmischung wird durch die Schrottplatzmitarbeiter getroffen. Vor der Beschickung des Ofens werden oftmals keine weiteren Analysen durchgeführt, und dies führt zu weiteren Unsicherheitsfaktoren in Bezug auf die Qualität des Endprodukts. Somit wird die Prozessführung der Stahlerzeugung durch die schwankende Qualität des eingesetzten Schrottes entscheidend beeinflusst. Dies kann sich nachteilig auf die Produktionskosten auswirken (Aufwand zur Schrottvorbehandlung und höherer Bedarf an Zuschlägen im Stahlwerksprozess zur Entfernung von Begleitelementen).

Abbildung 3: Stand der Technik bei der Schrottverwertung im Stahlwerk und Unsicherheitsfaktoren (eigene Darstellung)



4 Projektinhalt

Im Sinne der Nachhaltigkeit bzw. der Kreislaufwirtschaft gilt es, die Recyclingquote von Stahl möglichst hoch zu halten und prinzipiell muss am Ende eines Lebenszyklus aus Schrott wieder Stahl erzeugt werden. Obwohl der Begriff „Schrott“ oft negativ besetzt ist, muss betont werden, dass es sich bei Schrott um einen wertvollen Sekundärrohstoff handelt, der die Möglichkeit bietet, durch sein Recycling begrenzte Ressourcen zu schonen und einen wichtigen Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz zu leisten. Vor diesem Hintergrund soll das Projekt IRONER Innovationspotenziale für ein nachhaltiges Recycling von Stahl aufzeigen.

4.1. Materialflussanalyse zur Verfügbarkeit von Stahlschrott

Stahl ist einer der am häufigsten verwendeten Rohstoffe in unserer Gesellschaft. Die weltweite Rohstahlproduktion hat sich in den letzten Jahrzehnten fast verdoppelt (World Steel Association, 2020, S.7). In den wohlhabenden Regionen (z. B. USA oder EU) ist das Wachstum allerdings zum Stillstand gekommen. Für die kommenden Jahrzehnte wird weltweit nur ein moderates oder gar kein weiteres Wachstum vorhergesagt (Hatayama et al., 2010, S.6457–6463). Stagnierende Stahlproduktionsraten ermöglichen einen höheren Anteil von Schrott als Ressource für die Rohstahlproduktion. Dies wäre nicht nur in Bezug auf Ressourcenerhaltung von Vorteil, sondern auch in Bezug zu Umweltauswirkungen (z. B. Verringerung der CO₂-Emissionen (Broadbent, 2016, S.1658–1665), geringere Eutrophierung, Versauerung und photochemische Oxidation (López et al., 2020, S.12024)).

Etwa zwei Drittel der jährlichen Stahlproduktion in den USA basierten im Jahr 2014 auf Schrott (Zhu et al., 2019, S.11260–11268). Dieser Anteil von Schrott an der Rohstahlproduktion liegt in der EU bei etwa 54 % (Fellner et al., 2018, S.16–23) und war in den letzten Jahrzehnten rückläufig. In Österreich liegt der Anteil bei rund 37%.

In den letzten Jahrzehnten wurden neben zu den quantitativen Analysen von Stahlströmen auch zunehmend qualitative Aspekte berücksichtigt. Dahingehend wurden der Gehalt an Verunreinigungen in Form spezifischer Begleitelemente (meist Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Molybdän (Mo), Chrom (Cr) und/oder Zinn (Sn)) und mögliche Maßnahmen zu deren Beseitigung untersucht (z.B. (Daehn et al., 2019, S.1225–1240; Daigo et al., 2021, S.498–505)). 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, S.6599–6606), für Japan (z. B. (Daigo et al., 2017, S.388–393)). 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, S.753–757) und auf globaler Ebene könnte es in naher Zukunft auch soweit kommen (Daehn et al., 2017, S.6599–6606).

Österreich ist nicht nur eines der Länder mit der weltweit höchsten Pro-Kopf-Stahlproduktion (Österreich: 0,9 t/Jahr/Kopf, EU: 0,35 t/Jahr/Kopf, weltweit: 0,25 t/Jahr/Kopf (EUROFER, 2021, S.14-16), sondern führt auch ein anspruchsvolles Produktportfolio. Dieses besteht überwiegend aus

Flacherzeugnissen (World Steel Association, 2020, S.7-39), die einen hohen Reinheitsgrad der Ressourcen erfordern. Das bedeute eine besondere Herausforderung beim angestrebten erhöhen Einsatz von Schrottmengen zur Rohstahlproduktion.

Um diese Umstände zu untersuchen, wurde in diesem Arbeitspaket eine Fallstudie für den Zeitraum von 2008 bis 2030 durchgeführt, die auf einen ähnlichen Model für die EU basiert (Dworak und Fellner, 2021, S.105692; Dworak et al., 2022, S.106072).

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

4.1.1. Methoden und Daten

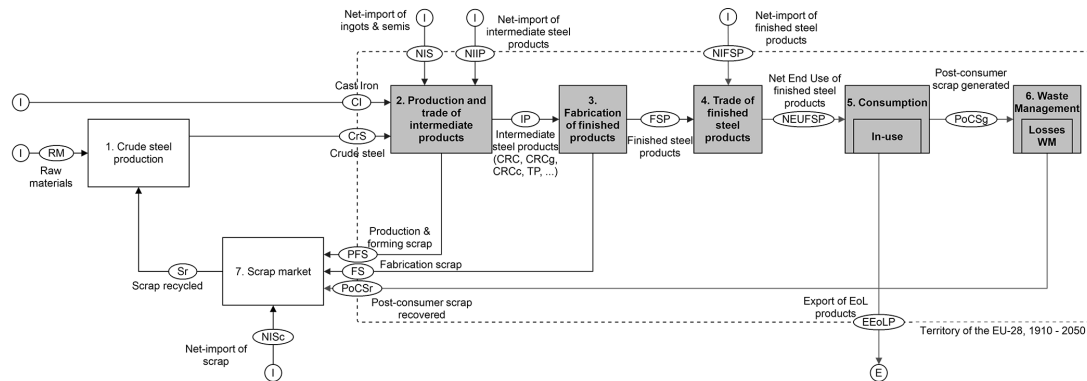
Material Fluss Analyse (MFA)

MFA (nach (Baccini und Brunner, 1991, S.1-157)) 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 Masseerhaltung. Durch Bilanzierung werden alle Inputs, Lager und Outputs des entsprechenden Materials jedes Prozesses, der Teil des bewerteten Systems ist, analysiert.

Abbildung 4 zeigt das MFA-System zur Modellierung der Stahlströme (übernommen aus (Dworak et al., 2022, S.106072)). Prozesse 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.

Abbildung 4: Vereinfachtes MFA-System zur Bewertung der Stahl- und Schrottströme übernommen aus (Dworak et al., 2022, S.106072). Prozesse mit Rechtecken innerhalb symbolisieren sogenannte Lager mit folgender Bedeutung: In-Use: in Verwendung befindliche Stahlprodukte (z.B. in Infrastruktur und Gebäuden verbauter Stahl, Stahl in Transportmitteln (z.B. Automobile, Züge), Stahlprodukte (Werkzeug, Haushaltsutensilien) usw.); Losses WM: Verlust in der Abfallwirtschaft (z.B. Deponien, Dissipation)



Es wurden Produktionsdaten aus der amtlichen Statistik (z.B. (World Steel Association, 2020, S.5)) und Produktionsdatensätze der österreichischen stahlproduzierenden Unternehmen verwendet, die von der Wirtschaftskammer Österreich (WKO) bereitgestellt werden. Die Transferkoeffizienten basieren auf vorhandenen Studien (Dworak und Fellner, 2021, S.105692; Dworak et al., 2022, S.106072; Cullen et al., 2012, S.13048–13055) und sind mit den oben genannten Datensätzen (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 Tabelle 2) und bestimmten Stahlerzeugnissen (z. B. Flachstahl-, Langstahl- oder Profilstahlerzeugnisse) zugeordnet, die für bestimmte Verwendungszwecke zugeordnet sind (z. B. Kraftfahrzeuge, Metallwaren oder Industrieanlagen).

Tabelle 2: Qualitätsklassen basierend auf max. tolerierbaren Anteil von Begleitelementen (Dworak und Fellner, 2021, S.105692)

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

Die gewählten Qualitätsklassen Q1 - Q4 korrelieren mit den Schrottklassen nach der EFR-Spezifikation (Tabelle 1). 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 (Linnhoff und Hindmarsh, 1983, S.745–763) 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, S.6599–6606)). 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.

4.1.2. 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 und Fellner, 2021, S.105692). Die Menge 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 wurde von dem in der EU anfallenden Altschrottmix übernommen.

In **Szenario 2** (Neuschrott Österreich (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 verfügbaren Schrotts auf die Rohstahlproduktion in Österreich bezogen (siehe Szenario 1). Die Anteile der Qualitätsklassen am Altschrott wurde 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, siehe Szenario 1&2) verfügbar ist. Als verfügbaren Altschrott wurden die Mengen angenommen, die in Österreich anfallen (basierend auf pro-Kopf Altschrottanfall in EU). Dies führt zu sehr viel niedrigeren Schrottmengen und damit zu niedrigeren potenziellen Schrottraten (verfügbarer Schrott versus Rohstahlbedarf) als in den Szenarien 1&2.

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 (internen 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, S.6599–6606)) zeigen, dass der Großteil dieses Schrottes 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 Schrottes jener der entsprechenden Stahlprodukte (nach der entsprechenden Lebensdauer) entspricht.

4.2. Ist-Erhebung der vorhandenen Schrottqualitäten und zur Schrotthandling in der österreichischen Stahl- und Schrottindustrie

In Befragungen der wichtigsten österreichischen Stakeholder der Stahl- und Schrottindustrie wurden Informationen zum Anfall bzw. Bedarf von Schrottmengen und -qualitäten in Österreich sowie zum Schrotthandling erhoben. Die Informationen dienen als Input für die Erstellung einer Schrott-Materialflussanalyse für Österreich. Aufgrund der Vertraulichkeit der erhobenen Daten werden im Folgenden Ergebnisse und Daten anonymisiert dargestellt.

4.3. Optimierung des Stoffstrommanagements beim Stahlrecycling

Im Rahmen des Projektes soll aufgezeigt werden, welche Datenlücken für eine vollständige und aussagekräftige Materialflussanalyse bestehen und welche weiteren Voraussetzungen erfüllt sein müssen, um eine zuverlässige Materialflussanalyse für Österreich erstellen zu können. Basierend auf den Ergebnissen der Materialflussanalyse und der qualitativen Material Pinch-Analyse sowie den Erkenntnissen der durchgeführten Stakeholder-Befragung wurden Optimierungspotenziale in den Bereichen Schrottmonitoring (Schrottstatistik) und Schrottaufbereitung (sowohl direkt am Ort des Schrottanfalls als auch am Ort der Wiederaufbereitung) definiert und anschließend Ideen und Ansätze für ein effizienteres und aussagekräftigeres Stoffstrommanagement generiert.

4.4. Notwendige technische und digitale Innovationen zum erhöhten Stahlrecycling

Der Recyclingprozess umfasst im Allgemeinen das Sammeln, Sortieren, Aufbereiten und Schmelzen von Schrott. 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. Um als Sekundärrohstoff im Stahlwerk eingesetzt werden zu können, muss der Schrott gewisse Mindestanforderungen, z. B. hinsichtlich des Schüttgewichts, der Form oder des Gehalts an Verunreinigungen, erfüllen. Insbesondere bei Altschrott können die geforderten Qualitätskriterien bzw. Grenzwerte für die im Schrott enthaltenen Begleitelemente oft nicht eingehalten werden. Um metallische Stoffströme in Österreich gezielt nutzen zu können, sind daher Maßnahmen und bessere Technologien zur zuverlässigen Identifizierung, Sortierung und Aufbereitung von Schrott notwendig. Nur so können Schrotte in die Wertschöpfungskette zurückgeführt werden und nach einer adäquaten Aufbereitung wertvolle Primärrohstoffe ersetzen. Aufgrund der Vielseitigkeit von Schrott (Qualitäten, Dimensionen etc.) stellt die Technologieentwicklung eine gewisse Herausforderung dar. Zusätzlich müssen sich die benötigten Technologien in den bereits bestehenden Betriebsablauf eingliedern können.

Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, Forschungsbereiche zu ermitteln und zu beschreiben, die in Zukunft adressiert werden müssen, damit ein gesteigertes Stahlrecycling ohne Beeinträchtigung der Endprodukteigenschaften gelingen kann. Hierbei wurde die gesamte Wertschöpfungskette berücksichtigt; angefangen bei der Schrottvorbehandlung über den Anlagenbau bis hin zum Stahlerzeuger.

Im Zuge einer Literaturrecherche wurden wissenschaftliche Quellen systematisch analysiert. Die Informationen wurden zusammengefasst und aufbereitet. Dabei standen vor allem Informationen zu den folgenden Fragestellungen im Fokus:

- Optimierungspotenziale bei der Schrottvorbehandlung,
- Optimierungsfelder bei der Schrottsortierung,
- Optimierungspotenziale im Bereich Schrottmonitoring und Stoffstrommanagement sowie
- Technische und digitale Innovationen.

Die der Literatur entnommenen Daten wurden schlussendlich mit den Informationen aus den Stakeholder-Interviews abgeglichen und ergänzt.

4.5. Auswirkungen eines vermehrten Schrotteinsatzes auf Stahlwerksprozesse und Werkstoffqualitäten

Die Transformation zur CO₂-armen/CO₂-neutralen Stahlherstellung und die damit verbundene erhöhte Nutzung der Elektrostahlroute bewirken einen gesteigerten Einsatz sekundärer Rohstoffe in der Stahlerzeugung. Die dabei durch den Schrott eingetragenen Begleitelemente, wie Kupfer, Molybdän, Chrom, Zinn oder Nickel, 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 Jahr 2020 wurde von (Daigo et al., 2021, S.498–505) eine umfassende Literaturrecherche zum

Einfluss von insgesamt fünfzehn Begleitelementen auf die sechs wesentlichsten Eigenschaften von Kohlenstoffstählen vorgenommen. Diese beinhaltet auch die Elemente Kupfer, Chrom, Molybdän, Nickel, Arsen (As) und Zinn, die insbesondere bei den Stakeholder-Befragungen mit Vertretern der heimischen Stahlproduzenten als relevant angesehen werden. Tabelle 3 fasst die Ergebnisse der Literaturrecherche (Daigo et al., 2021, S.498–505) über den Einfluss dieser sechs Elemente zusammen.

Tabelle 3: Beeinflussung ausgewählter Elemente auf Produkteigenschaften mit +: Positiver Einfluss; -: Negativer Einfluss; Nein: Kein Einfluss; +/-: Positiver oder negativer Einfluss (Daigo et al., 2021, S.498–505)

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

Aufgrund unterschiedlicher Anwendungsfälle und Produktionsrouten bergen Begleitelemente verschiedene Problematiken, welche in weiterer Folge exemplarisch behandelt werden. Folgende Elemente werden dabei näher betrachtet:

- Kupfer,
- Molybdän,
- Zinn,
- Arsen,
- Antimon,
- Nickel und
- Blei.

Es ist bekannt, dass Legierungselemente das Umwandlungsverhalten von Stählen maßgeblich beeinflussen, wodurch es zum Beispiel möglich wird, Hochtemperaturphasen wie den Austenit bis zur Raumtemperatur zu stabilisieren. Deren Wirkung lässt sich durch ihre Verschiebung der Phasengrenzen im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm beschreiben. Chrom und Molybdän erhöhen den A₃-Punkt und erniedrigen den A₄-Punkt. Dadurch wird der Existenzbereich des Austenits eingengt, sodass die Stabilität des Ferrits erhöht wird. Im Gegensatz dazu ist Nickel ein bekannter Austenitbildner, indem es den A₃-Punkt erniedrigt und den A₄-Punkt erhöht (Bargel und Schulze, 2012, S.441). Der Einfluss anderer Begleitelemente, insbesondere Arsen, Antimon und Zinn, ist in der Literatur im Detail nicht bekannt.

Daher wurden quantenmechanische Berechnungen im Rahmen der Density Functional Theory (DFT) auf die Ferritstabilität sowie CALPHAD-Berechnungen mit Hilfe der TCFE10-Datenbank von Thermocalc zu Untersuchung des Einflusses von Kupfer auf die Bildungstriebkraft des Ferrits in einem 0,15C-0,48Si-1,48Mn Stahl durchgeführt.

4.6. Volkswirtschaftliche und klimapolitische Einbettung eines vermehrten Schrotteinsatzes

Die Relevanz von verstärktem Stahlschrotteinsatz für Klimaschutz und wirtschaftliche Entwicklung zur Bedienung weiterhin absehbar hoher Stahlnachfrage wird durch Betrachtung zwei zentraler im klimapolitischen Kontext vorliegender Knappheiten deutlich. Erstens, das global und auch für Österreich abgeleitete noch zur Verfügung stehende Treibhausgasbudget zur Einhaltung der Pariser Klimaziele ist knapp und begrenzt (Meyer und Steininger, 2017, S.5-22). Anstelle eines (momentanen politischen Vorstellungen folgend) 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-Budgets zu vereinen. Dies gilt quer über Sektoren, somit auch für den Eisen- und Stahlsektor, wobei zweitens, neben Ersatz von Eisen und Stahl durch andere emissionsärmere Materialien in unterschiedlichsten Anwendungen (z.B. im Hoch- und Tiefbau) vor allem der Ersatz von zurzeit intensiver Nutzung fossiler Energieträger in der Primärproduktion durch erneuerbare klimafreundlichere eine zentrale Stellschraube für die strategische Neuausrichtung des Stahlsektors ist. Diese klimafreundlicheren erneuerbaren Energieträger sind jedoch durch absehbare Elektrifizierungsdynamiken in anderen Bereichen auch zeitlich und räumlich vor allem aus inländischen Quellen äußerst knapp und begrenzt (AEA, 2022, S.5-40; WKO, 2019, S.1-55). Beim Ausloten von Zugängen zur Bewältigung dieser Knappheiten und damit verbundener Risiken ergibt sich die Bedeutung der verstärkten kreislaufwirtschaftlichen Nutzung von Stahlschrotten für Volkswirtschaft und Klimaschutz. Erste Aussagen zur Abschätzung volkswirtschaftlicher Effekte eines vermehrten Schrotteinsatzes und den erzielbaren Potenzialen zur Senkung der Treibhausgasemission finden sich in Abschnitt 5.5.

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

5.1. Schrottverfügbarkeit in Österreich

Die Schrottverfügbarkeit wurde sowohl mittels einem Bilanzmodell als auch durch eine Stakeholder-Befragung untersucht.

5.1.1. Materialflussanalyse zur Verfügbarkeit von Stahlschrott

Schrottverfügbarkeit

Die Schrottverfügbarkeit bei Szenario 1&2 liegt 2020 bei 63% und steigt bis 2030 auf 67% der Rohstahlproduktion. In Szenario 3, wo kein Import von Altschrott berücksichtigt wird, liegt dieser Anteil bei etwas über 35%.

Zusammensetzung und Einsatzfähigkeit

In Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7 sind die Ergebnisse der qualitativen Material Pinch-Analyse grafisch dargestellt. Die Grafik zeigt den verfügbaren Schrott und Rohstahlbedarf (x-Achse) und deren vorliegender 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 können, aber nicht umgekehrt.

Option A – Aktuelle Situation

Szenario 1&2 (oberer Teil in Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7) 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. 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 Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7 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 Großteiles 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.

Abbildung 5: Qualitative Material Pinch-Analyse, Szenario 1: Schrottverfügbarkeit EU (Dworak et al., 2022, S.4)

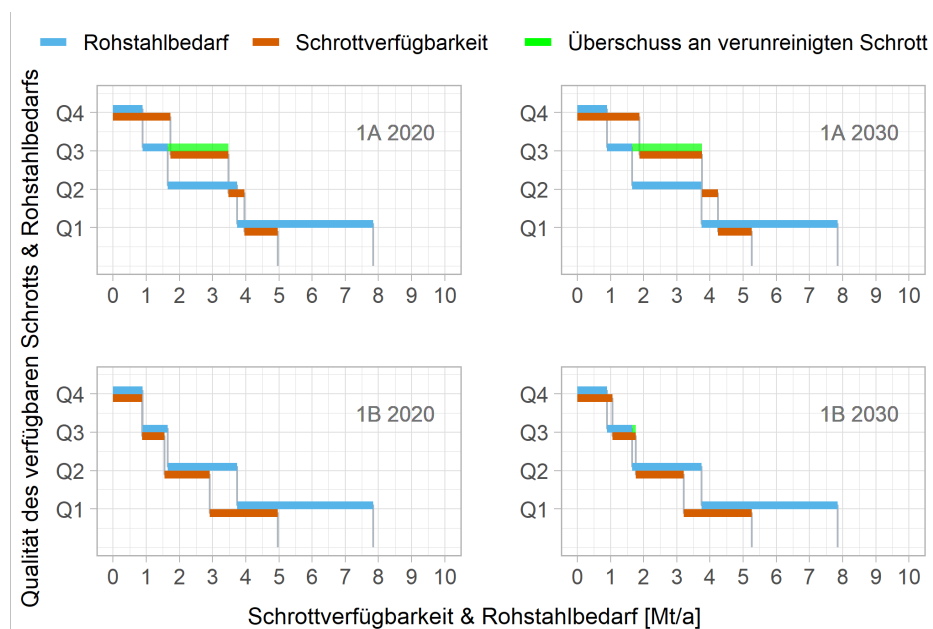


Abbildung 6: Qualitative Material Pinch-Analyse, Szenario 2: Neuschrott AT, Altschrott EU (Dworak et al., 2022, S.4)

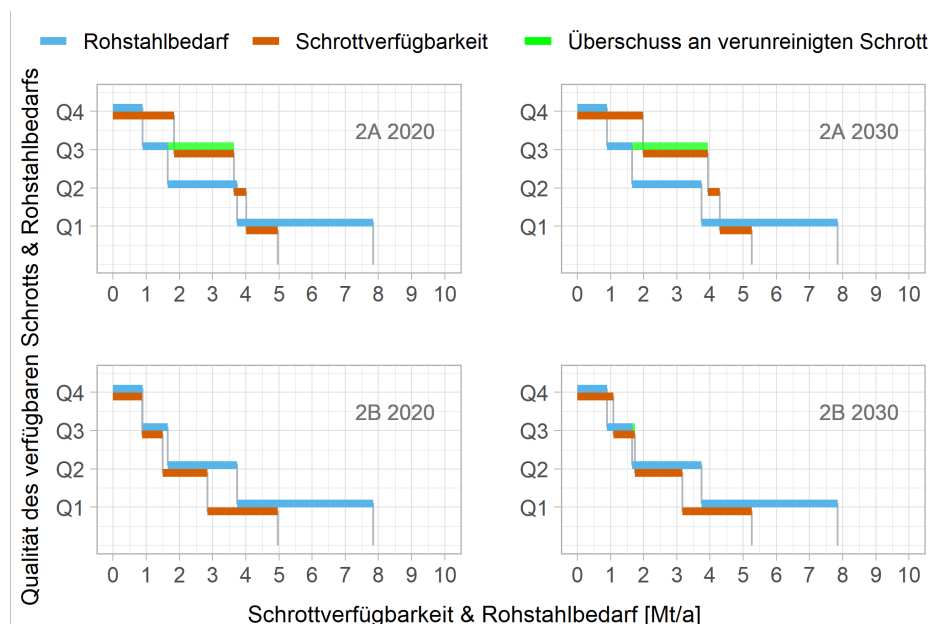
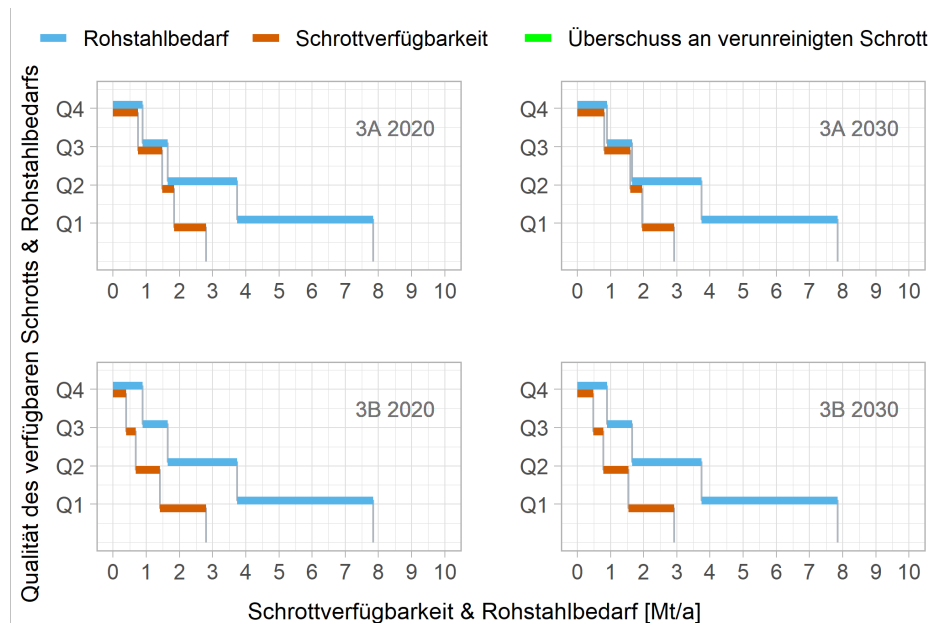


Abbildung 7: Qualitative Material Pinch-Analyse, Szenario 3: Neuschrott AT, Altschrott AT (Dworak et al., 2022, S.5)



5.1.2. Ergebnisse aus den Stakeholder-Interviews

Die Ergebnisse aus den Stakeholder-Interviews wurden in die Untergruppen Schrottbedarf und Schrottverfügbarkeit, Schrotthandling und Begleitelemente gegliedert.

Schrottbedarf und -verfügbarkeit

Insgesamt wurden in den LD-Konvertern der integrierten Stahlwerke bzw. in den Elektrolichtbogenöfen, die in Österreich im Einsatz sind, im Jahr 2017 ca. 1,5 Mio. t Schrott eingesetzt. Diese 1,5 Mio. t Schrott umfassen die über den Schrotthandel abgedeckten Mengen, der Eigenschrott der Stahlerzeuger; der als werksinterner Rücklauf in der Stahlproduktion eingesetzt wird, ist in dieser Menge nicht enthalten. Diese 1,5 Mio. t werden zu 58% über importierten Schrott und zu 42% über inländischen Schrott gedeckt. 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/Jahr), Tschechien (225.000 t/Jahr), Slowakei (80.000 t/Jahr), Italien (17.000 t/Jahr), Slowenien (16.000 t/Jahr). Die Exportmengen gehen zum größten Teil nach Italien (550.000 t/Jahr) und Deutschland (300.000 t/Jahr), der Rest über Kroatien und Rumänien in die Türkei.

Abbildung 8 bzw. Tabelle 4 fassen 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.

Abbildung 8: Schrottbedarf und Schrottherkunft für die Stahlerzeugung in Österreich im Jahr 2017 (eigene Darstellung, Datenbasis: im Rahmen des Projektes durchgeführte Stakeholder-Interviews)

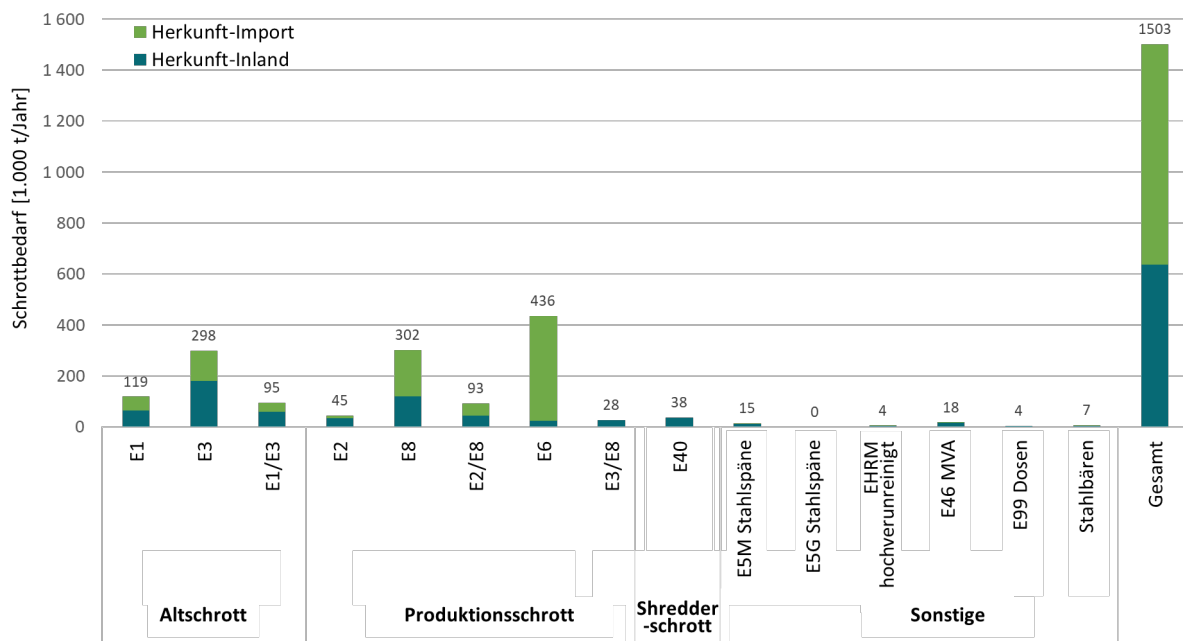


Tabelle 4: Schrottbedarf und Schrottherkunft für die Stahlerzeugung in Österreich im Jahr 2017 (Dworak et al., 2022, S.6)

	Altschrott			Produktionsschrott				Shredderschrott	Sonstige						Gesamt	
	E1	E3	E1/E3	E2	E8	E2/E8	E6	E3/E8	E40	E5M	E5G	EHRM	E46	E99		Stahlbären
	[t/a] (2017)															
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%

Der zukünftige Schrottbedarf wurde für die nächsten 3 Jahre mit einer Zunahme von 10% bis 15% bzw. für die nächsten 5 bis 10 Jahre mit einer Zunahme von 70% bis 100% eingeschätzt. Haupt-Begründung sind die geplanten Technologieumstellungen in der Primärstahlerzeugung von der Hochofenroute auf Elektrolichtbogenöfen. 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
 - 260.000 Fahrzeuge werden jährlich abgemeldet
 - 60.000 kommen in die Shredder
 - 40.000 in den Gebrauchtwagenmarkt
 - 160.000 werden mit unbekanntem Ziel exportiert

Schrotthandling

Für die Identifizierung des Innovations- und Forschungsbedarfs in der Schrottaufbereitung und – sortierung ist die Kenntnis der heutigen Schrottlogistik der Ausgangspunkt. Diese unterscheidet sich bei Schrotthändlern und beim Stahlerzeuger. 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 Stahlerzeuger geliefert. Die Befragung bestätigt den bereits im Projektantrag festgestellten Stand der Technik der Schrottlogistik, dass nur stichprobenweise chemische Analysen durchgeführt werden, Technologien für flächendeckende Analysen insbesondere von Begleitelementen werden heute kaum eingesetzt.

Das Schrotthandling bei Schrotthändler beinhaltet folgende Vorgänge:

- Nach Anlieferung: visuelle Prüfung und stichprobenweise chemische Analyse
- Einsatz von Scheren und Brennschneidern für große Stücke
- Shredderung
- Luftstromtrennung für Leichtfraktion
- Trommelmagnet
- Trennung von Nichteisenmetallen
- Lagerung Shredder-Schrott in Boxen nach Schrottklassen
- sortenreine Lieferung an Abnehmer

Das Schrotthandling bei Stahlerzeugern umfasst folgende Tätigkeiten:

- Anlieferung erfolgt bereits sortiert
- Radioaktivitätsmessung (Standard)
- Zwischenlagerung erfolgt in Boxen nach Schrottklassen
- Chemische Analysen erfolgen stichprobenweise
- Eine visuelle Prüfung erfolgt bei der Schrottkorb-Chargierung
- Es erfolgt eine chemische Erstanalyse des erzeugten Stahls

Begleitelemente

Durch vermehrten Einsatz von Schrott im Elektrolichtbogenofen 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 Stahlliegierungen 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 (Tabelle 5, Tabelle 6, Tabelle 7) wurden insbesondere die Stahlerzeuger befragt. Die Ergebnisse zu den Fragen sind im Folgenden dargestellt:

- Welche Begleitelemente und deren Grenzwerte sind für die Stahlproduktion relevant?

Tabelle 5: Relevante Begleitelemente in der Stahlproduktion mit der Datenbasis aus eigener Stakeholder-Interviews (eigene Darstellung, Datenbasis: im Rahmen des Projektes durchgeführte Stakeholder-Interviews)

	As	Cu	Cr	Mo	Ni	Pb	Sn	Zn
LD-Stahl		X	X	X	X		X	
Edelstahl	X	X					X	
Baustahl		X	X	X	X		X	

- Welche Grenzwerte der folgenden Begleitelemente müssen für die erzeugten Stahlprodukte bzw. Halbzeuge für bestimmte Branchen eingehalten werden?

Tabelle 6: Grenzwerte für ausgewählte Stahlprodukte (k.A.: keine Angabe) mit der Datenbasis aus eigener Stakeholder-Interviews (eigene Darstellung, Datenbasis: im Rahmen des Projektes durchgeführte Stakeholder-Interviews)

	As [%]	Cu [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Pb [%]	Sn [%]	Zn [%]
LD-Stahl								
Baustahl	k.A.	0,15	0,12	0,05	0,2	k.A.	0,015	k.A.
Elektroband	k.A.	0,03	0,02	0,008	0,02	k.A.	0,01	k.A.
Weichstahl IF	k.A.	0,04	0,05	0,01	0,08	k.A.	0,01	k.A.
Baustahl hochfest	k.A.	0,04	0,05	0,01	0,08	k.A.	0,01	k.A.
Röhrenstahl	k.A.	0,1	0,1	0,03	0,2	k.A.	0,01	k.A.

	As [%]	Cu [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Pb [%]	Sn [%]	Zn [%]
Edelstahl								
Energie- maschinen	0,01	0,1	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	0,01	k.A.
Baustahl								
Betonstahl	k.A.	0,5	0,15	0,03	0,15	0,0015	0,024	0,0033

- Wie hoch ist der Anteil von Begleitelementen in den unterschiedlichen Schrottfractionen (-klassen) die in der Produktion eingesetzt werden?

Tabelle 7: Anteil an Begleitelemente in verschiedenen Schrottfractionen (k.A.: keine Angaben) mit der Datenbasis aus eigener Stakeholder-Interviews (eigene Darstellung, Datenbasis: im Rahmen des Projektes durchgeführte Stakeholder-Interviews)

	As [%]	Cu [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Pb [%]	Sn [%]	Zn [%]
LD-Stahl								
E3	k.A.	0,22	0,24	0,02	0,1	k.A.	<0,01	k.A.
E6/E8	k.A.	0,03	0,05	0,01	0,02	k.A.	<0,01	k.A.

- Welche Begleitelemente sind eine besondere Herausforderung (mit relevant hohem Anteil im Schrott und nur aufwendig oder praktisch nicht zu entfernen)?
 - LD-Stahl: Cu, Ni, Mo
 - Edelstahl: As, Sn, Cu, P
 - Baustahl: Cu, Pb, P

5.2. Optimierungspotenziale des Stoffstrommanagements beim Stahlrecycling

Die Optimierung der Materiallogistik und der Einsatz eines innovativen Stoffstrommanagements betrifft die gesamten Wertschöpfungskette und diesbezügliche Maßnahmen müssen sich möglichst harmonisch in bestehenden Prozessabläufe integrieren lassen (Sauter, 2022, S.121-122).

In der europäischen Stahlschrottliste ist der anfallende Stahlschrott in 11 Sorten gegliedert (Sauter, 2022, S.121-122). Eine Gegenüberstellung mit den produzierten Stahlerzeugnissen zeigt, dass dieser Klassifizierung einer Vielzahl von Stahlsorten (ca. 80-fach) gegenübersteht und die produzierten Stahlsorten bzw. deren Gruppenzuordnungen für die Klassifizierung der produzierten Schrottsorten überdies nicht relevant sind. Dementsprechend erscheint die Klassifizierung der Schotten zu allgemein (grob) bzw. nicht den aktuellen Anforderungen an ein möglichst hochwertiges Recycling zu entsprechen (Sauter, 2022, S.121-122).

Im Interesse einer größtmöglichen Sortierreinheit sollte der Schrott unmittelbar nach seiner Entstehung gesammelt und sortiert werden, da jeder weitere Umschlag des Materials das Risiko einer möglichen Verunreinigung oder Vermischung mit weiteren Materialien birgt. Diese Vorgehensweise ist allerdings in vielen Produktionsstätten z.B. aufgrund der vorhandenen Werksstrukturen oder des begrenzten Platzangebots nur bedingt umsetzbar (Sauter, 2022, S.121-122). Im Hinblick auf End-of-Life-Güter werden Systeme zur Erfassung dieser Produkte in größerem Umfang, mit erweiterter Kapazität und Genauigkeit, insbesondere unter dem Gesichtspunkt des zunehmenden Anfalls, benötigt (Material Economics, 2020, S.16-34). Zudem werden diese im Allgemeinen nicht flächendeckend in ihre einzelnen Bestandteile zerlegt, wodurch ein ordnungsgemäßes und damit hochwertiges Recycling erschwert wird (Sauter, 2022, S.121-122).

Ein intelligentes Stoffstrommanagement und die Verknüpfung von Schrottlogistik und Produktionsprozessmanagement können zu einer optimierten und effizienten Wiederverwertung von Schrott im metallurgischen Prozess beitragen (Hiebel und Nühlen, 2016, S.117-136). Dies beinhaltet eine präzise Charakterisierung und Separation, ein Lagerhaltungssystem für Schrottplätze, das die Verfügbarkeit von Chargenmaterialien auf dem Schrottplatz verfolgt, die Ermittlung der optimalen Schrottmischung (inkl. frühzeitige Erkennung der tatsächlich chargierten Materialien beispielsweise durch optische Systeme) sowie die entsprechende Abstimmung der Schmelz- und Verarbeitungsprozesse (European Steel Technology Platform (ESTEP), 2021, S.10-85).

Auch Technologien in Zusammenhang mit Industrie 4.0, wie künstliche Intelligenz und Prozessdigitalisierung, unterstützen eine optimierte Abwicklung sowohl auf dem Schrottplatz als auch im Stahlwerk. In diesem Bereich bestehen bereits diverse Projekte und Forschungsaktivitäten (TENOVA, 2022, online; Stahl+Eisen, 2021, online).

5.2.1. Datenlücken

Hinsichtlich der Identifikation der Datenlücken wurde zwischen den Bereichen Stahlflüsse und Begleitelemente unterschieden.

Stahlflüsse

Für Flachprodukte gibt es ein etabliertes (freiwilliges) Reportingsystem. Dieses erfasst neben den ausgelieferten Stahlprodukten auch die entsprechenden Liefersektoren (z. B. aggregiert in (EUROFER, 2018, S.1-68; EUROFER, 2021, S.1-72)), Rohdaten stehen für Forschungszwecke zur Verfügung). Allerdings steigt der Anteil an Stahlprodukten, die nicht direkt an Weiterverarbeiter geliefert werden, und damit keinem Sektor zugeordnet werden kann, in Österreich stetig an (2004: 20%, 2021: 49%, (WKO)). Da Begleitelemente neben dem Stahlprodukt selbst auch stark von der Verwendung beeinflusst werden, ist der Anteil Lieferungen in Endverbrauchersektoren äußerst relevant.

Für Langprodukte ist kein Reporting etabliert, das auch Liefersektoren abdeckt. Auch wenn bekannt ist, dass ein Großteil (65%, (Cullen et al., 2012, S.13048–13055)) der Langprodukte in den Bausektor (Gebäude und Infrastruktur) zum Einsatz kommen, wäre auch hier eine genauere Aufteilung essenziell, um die Belastung durch Begleitelement ableiten zu können.

Begleitelemente

Im präsentierten Modell (siehe Kapitel 4.1) wird eine Gruppe von relevanten Begleitelementen (Cu, Sn, Mo, Ni, Cr) berücksichtigt (siehe auch (Daehn et al., 2017, S.6599–6606; Dworak und Fellner,

2021, S.105692; Dworak et al., 2022, S.106072; Huellen et al., 2006, mündl. Konferenzbeitrag; Toi et al., 1997, S.850–855)). Eine detailliertere Auflösung (Qualitätskategorien, einzelne Elemente) ist für Österreich (und Europa) mit den verfügbaren Daten nicht möglich. Modelle mit genaueren Auflösungen wurden schon umgesetzt (Japan z.B. (Daigo et al., 2017, S.388–393; Daigo und Goto, 2015, S.2027–2032; Nakamura et al., 2017, S.9469–9476; Oda et al., 2010, S.314–323)), was zeigt, dass solche Modelle prinzipiell möglich sind.

Diese genauere Auflösung würde gezielteres Management und potenziell auch gezielte Wertschöpfung ermöglichen, indem erforderliche Legierungselemente substituiert werden können. Weiters gäbe ein detailliertes Model Aufschluss darüber, welche Elemente die größte Herausforderung darstellen.

5.2.2. Monitoring/Aufbereitung

Das erstellte Bilanzmodell zeigt, dass großes Potenzial in Sortierung nach Begleitelementen liegt. Allerdings reicht selbst das theoretische Potenzial der Schrottsortierung (vollständige Sortierung ohne Berücksichtigung von Verunreinigung oder Mischung von Fraktionen) nicht aus, um Altschrott anteilig zum Anfall (2030 rund 67%, siehe Kapitel 5.1.1) einsetzen zu können. Deshalb müssen auch andere Methoden zur Schrottreinigung zum Einsatz kommen.

Um den Schrotteinsatz zu verbessern ist es essenziell, die Zusammensetzung bei Anlieferung so genau wie möglich festzustellen, um zur Verfügung stehende Schrottmengen optimal einsetzen zu können.

5.3. Technische und digitale Innovationen

Innovationsbedarf aus Sicht des Schrotthandels

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. Eine Förderband-Geschwindigkeit von 3 Metern pro Sekunde ist für die Schrottmengen erforderlich. Auch roboter-gestützte Sortierung ist ein Forschungsthema (Flexrobotertechnik). Eventuell könnten Schrott-Aufbereiter auch eigene Umschmelzwerke betreiben (Induktionsofen und Pelletierung), um genau definierte Stahlqualitäten (über Probennahme in der Flüssigphase) liefern zu können. Diese wären besonders für metallhaltige Stäube und (Schleif-)Metallschlämme eine Möglichkeit. Wirtschaftlich könnte ein Induktionsofen eventuell als Energiespeicher über günstigen Strom betrieben werden, bzw. über die CO₂-Preise für die (Primär-) Stahlerzeugung.

Innovationsbedarf aus Sicht des Anlagenbauers

Die Oberflächen-Analyse-Methode LIBS ist eigentlich schon 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 haben die Nebenprodukte Stäube und Schlacken, mit geschätzten 200 – 300 kt / Jahr in Österreich. 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...) erfordert die Sortierung mit Oberflächenmethoden eine entsprechende Shredderung für Vereinzelung mit ausreichend geringer Stückgröße (Kostenthema). Blei, Zinn und Arsen sind aus Sicht des Anlagenbauers im metallurgischen Prozess weniger kritisch, da sie im Elektrolichtbogenofen verdampfen, was jedoch zu einem Emissions-Luftschadstoffproblem führt.

Innovationsbedarf aus Sicht der Stahlerzeuger

Fördertechnik und Stückigkeit sind die Hauptherausforderungen bei der Sortierung mittels LIBS, Röntgendiffraktion (XRD) und XRF (bzw. bei einer Kombination aus LIBS und XRF). Vor allem der Mengenstrom stellt noch ein Problem dar, insbesondere wenn auch Roboter zum Einsatz kommen müssen, um große E3-Einzelschrottstücke auszusortieren (Fragestellung: Kann ein Roboter 2 Tonnen heben?). Das italienische Unternehmen Danieli betreibt in Italien eine Versuchs-Anlage für Sortierung von Fraktion mit Kupfergehalten <0,1% und >0,1% mittels prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA, siehe auch (Mannan et al., 2013, S.151)). Des Weiteren empfinden Stahlerzeuger die Einteilung der Schrottklassen (Bandbreiten) für die Schrottcharakterisierung (zumindest im Edelstahlbereich) als zu grob.

Abschließend wurden die Stakeholder um eine Einschätzung zu nicht-technologischen Maßnahmen zur Erhöhung der Stahlrecycling-Rate gebeten. Die Ergebnisse (Tabelle 8) sind im Folgenden zusammengefasst. Die Zahl in den einzelnen Zellen gibt die Anzahl der Stakeholder an, die die jeweilige Maßnahme für geeignet / überwiegend geeignet / eher nicht geeignet / nicht geeignet erachten.

Tabelle 8: Nicht-technologische Maßnahmen zur Erhöhung des Stahlrecyclings (einschließlich einer Einschätzung ihrer Wirksamkeit, +: mehrstimmig geeignete Maßnahme, -: mehrstimmig nicht geeignete Maßnahme, (Dworak et al., 2022, S.7))

Maßnahme		Geeignet	Überwiegend geeignet	Eher nicht geeignet	Nicht geeignet
Entwicklung eines Anreizsystems, um die Lebensdauer der Produkte zu erhöhen (inkl. Einführung eines Kennzeichnungssystems)	-		1	2	2
Einführen von Mindestanforderungen in Bezug auf die Demontage-Fähigkeit und Separierung von Produkten	+	1	3		1
Neue Geschäftsmodelle für Stahlerzeuger (z.B. leasen statt besitzen) bzw. für Schrottaufbereiter (z.B. Demontage/Rückbau in Kooperation mit Automobilindustrie, Elektrogeräte-industrie)		1	2	1	1
Schließen gesetzlicher Lücken und verbesserte Registrierung- und Abmeldemechanismen zur Vermeidung illegaler Ausfuhren von Altfahrzeugen (z.B. Autoverkauf ohne Pickerl nicht mehr möglich)	+	4	1		
Kommunikations-Plattformen entlang der Wertschöpfungsketten (Schrott-Entfallstelle – Aufbereiter – Stahlerzeuger)	+	3	2		
Entwicklung von Recycling-Netzwerken zum gemeinsamen effizienteren Vorantreiben von Innovationen im Stahlrecycling	+	3	2		

5.4. Einfluss eines vermehrten Schrotteinsatzes auf metallurgische Prozesse und werkstoffliche Produkteigenschaften

Im Rahmen des Projektes wurde der Einfluss ausgewählter Begleitelemente auf den Stahlherstellungsprozesse sowie auf die Werkstoffeigenschaften (Umwandlungsverhalten und Einfluss auf ausgewählte Stahlgüten) näher betrachtet.

5.4.1. Betrachtung ausgewählter Begleitelemente

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

Kupfer

Besondere Relevanz unter den Begleitelementen hat Kupfer. Als Legierungselement findet dieses bis auf wenige Ausnahmen, wie etwa bei wetterfestem Baustahl oder zur Ausscheidungshärtung mit $>1\text{m}\%$ in ferritischen Stählen, keine Anwendung. Vor allem Automobilshredder enthält teils beachtliche Mengen Kupfer von $0,2\text{ m}\%$ und mehr mit steigender Tendenz ausgelöst durch die Elektromobilität. Die beste Möglichkeit zur Entfernung dieses Begleitelements ist die sorgfältige Sortierung des Schrottes. Aufgrund des edlen Charakters des Kupfers 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 (Ono et al., 1995, S.372–376) oder als Chlorid (Sasabe et al., 1996, S.129–134). 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, S.1-25). Dieses Phänomen ist grundsätzlich darauf zurückzuführen, dass Eisen in einer oxidierenden Atmosphäre eine Zunderschicht bildet, unter der sich Kupfer anreichert (Uchino et al., 2001, S.260–264). Dabei kann sich Kupfer in einem solchen Ausmaß anreichern, dass es die maximale Löslichkeit im Austenit ($\sim 9\text{ m}\%$ bei 1250 °C) überschreitet (Mintz, 1999, S.833–855). Da Warmumformungsprozesse in der Regel in einem Temperaturbereich zwischen $1050\text{--}1200\text{ °C}$ (Bell et al., 2006, S.1-25) stattfinden und der Schmelzpunkt von Kupfer bei 1080 °C (Uchino et al., 2001, S.260–264) liegt, verflüssigt sich die mit Kupfer angereicherte Phase. Diese flüssige Phase kann die Austenitkorgrenzen penetrieren und Oberflächenrisse auslösen. Die Zugabe von Nickel stellt eine Möglichkeit dar, die schädliche Wirkung von Kupfer abzuschwächen. Dadurch wird der Austenit stabilisiert und die Löslichkeit von Kupfer erhöht, sodass die Ausscheidung verhindert wird (Mintz, 1999, S.833–855). Des Weiteren erhöht Nickel den Schmelzpunkt der kupferreichen Phase (Coutsouradis et al., 1983, 7-1-7/24). Im Gegensatz dazu verringert Zinn die Löslichkeit von Kupfer im Austenit (Leroy et al., 1995) und senkt auch die Schmelztemperatur der mit Kupfer und Zinn angereicherten Zone (Mintz, 1999, S.833–855), wodurch die Heiß- und Warmrissigkeit begünstigt wird. Antimon zeigt ebenfalls einen negativen Einfluss, da es die Löslichkeit von Kupfer im Austenit in ähnlichem Maße wie Zinn (Leroy et al., 1995, S.1-158) reduziert.

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.

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., 2014, S.1807–1812), Chlorid (Sasabe et al., 1996, S.129–134) oder intermetallische Phase Ca_2Sn (Iron and Steel Society, 1996, S.1-592).

Zinn, Arsen und Antimon neigen dazu, sich an freien Oberflächen, Korngrenzen und Phasengrenzen abzuscheiden (Herman und Leroy, 1996, S.35–43). Berechnungen von Seah (Seah, 1980, S.955–962) zeigen, dass die Abnahme der Korngrenzenkohäsion in Ferrit durch größere Segregationsatome verstärkt wird. Infolgedessen haben Zinn und Antimon eine schädlichere Wirkung als die kleineren Phosphor- und Arsen-Atome, während kleine Atome wie Stickstoff, Kohlenstoff und Bor der Versprödung entgegenwirken. Messungen von Grabke (Grabke, 1989, S.529–538) unter Verwendung der Auger-Elektronenspektroskopie an Fe-Sn-C-Legierungen zeigen, dass das Risiko der Korngrenzensegregation durch Zinn-Atome gering ist. Der Grund dafür ist, dass Kohlenstoff-Atome die Zinn-Atome von der Korngrenze verdrängen, wodurch die Neigung zu intergranularen Brüchen verringert wird. Andererseits ist bekannt, dass Zinn, Antimon und Arsen in niedriglegierten Stählen, die Chrom, Mangan und Nickel enthalten, zu einer reversiblen Anlassversprödung durch Korngrenzensegregation führen. Dieser Effekt tritt nach dem Anlassen (600-700 °C) bei langsamer Abkühlung durch einen Temperaturbereich von 550-350 °C oder während des Betriebs in diesem Temperaturbereich auf. Der Einfluss von Chrom und Mangan wird so erklärt, dass diese Elemente die Kohlenstoffaktivität verringern, wodurch diese die Korngrenzen nicht mehr vor der Anreicherung mit Zinn, Antimon oder Arsen schützen können. Die versprödende Wirkung durch die Kombination mit Nickel wird durch die Verringerung der Löslichkeit von Zinn und Antimon im Ferrit und die Tendenz zur Bildung intermetallischer Verbindungen erklärt.

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 werden 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.

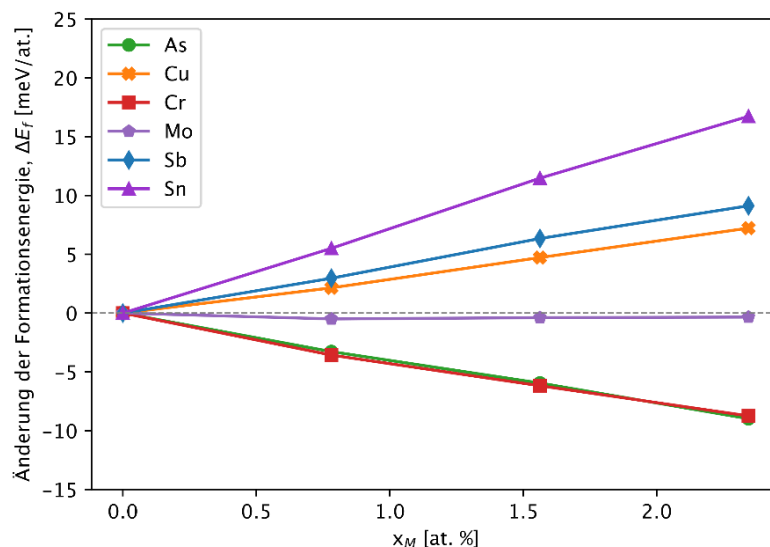
Da für einige genannte Elemente, beispielsweise Nickel, Kupfer und Molybdän, zurzeit keine Möglichkeit der Abscheidung existieren, besteht hier das Potenzial der Anreicherung dieser im Schrott, wodurch sich die beschriebene Problematik weiter zu verschärfen droht.

5.4.2. Auswirkung von Begleitelementen auf das Umwandlungsverhalten

Es ist bekannt, dass Legierungselemente das Umwandlungsverhalten von Stählen maßgeblich beeinflussen, wodurch es zum Beispiel möglich wird, Hochtemperaturphasen wie den Austenit bis zur Raumtemperatur zu stabilisieren. Deren Wirkung lässt sich durch ihre Verschiebung der Phasengrenzen im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm beschreiben. Chrom und Molybdän erhöhen den A_3 -Punkt und erniedrigen den A_4 -Punkt. Dadurch wird der Existenzbereich des Austenits eingeengt, sodass die Stabilität des Ferrits erhöht wird. Im Gegensatz dazu ist Nickel ein bekannter Austenitbildner, indem es den A_3 -Punkt erniedrigt und den A_4 -Punkt erhöht (Bargel und Schulze, 2012, S.441). Der Einfluss anderer Begleitelemente, insbesondere Arsen, Antimon und Zinn, ist in der Literatur im Detail nicht bekannt.

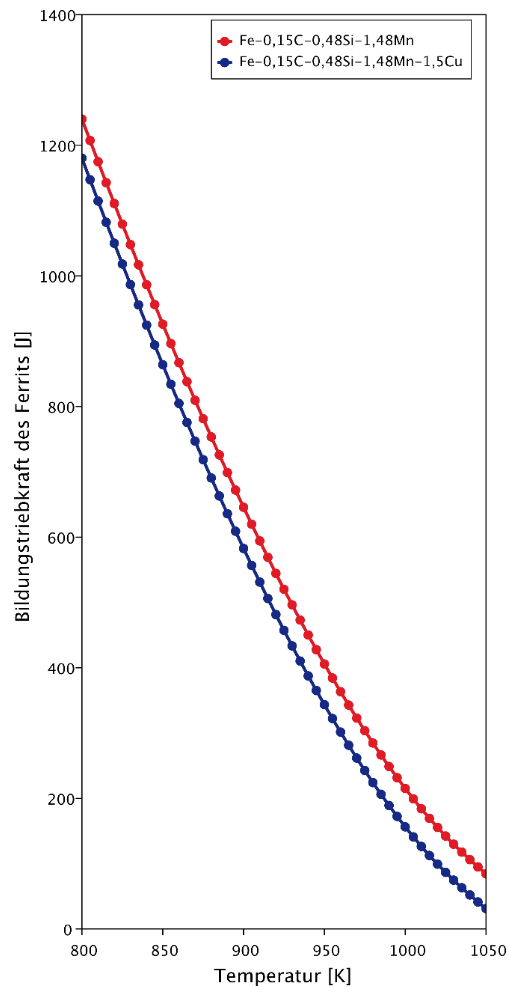
Daher wurden quantenmechanische Berechnungen im Rahmen der Density Functional Theory (DFT) auf die Ferritstabilität durchgeführt. Abbildung 9 zeigt, dass die bereits bekannte Ferritstabilisierende Wirkung der Elemente Chrom und Molybdän richtig vorhergesagt wird, wobei der Einfluss von ersterem größer ist als der von Molybdän. Letzteres bestätigt die potente Wirkung von Chrom auf die Ferritstabilität, welche auch durch dessen Einsatz zur Herstellung korrosionsbeständiger ferritischer Stähle bekannt ist. Des Weiteren zeigt die Berechnung, dass Arsen die Ferritstabilität gleichermaßen beeinflusst wie Chrom. Hingegen führen die Elemente Kupfer, Antimon und Zinn zu einer Destabilisierung des Ferrits.

Abbildung 9: Einfluss der Begleitelemente auf die Stabilität von Ferrit (eigene Darstellung, Datenbasis: im Rahmen des Projektes durchgeführte Berechnung)



CALPHAD-Berechnungen mit Hilfe der TCFE10-Datenbank von Thermocalc über den Einfluss von Kupfer auf die Bildungstriebkraft des Ferrits in einem 0,15C-0,48Si-1,48Mn Stahl (Abbildung 10) zeigen, dass Kupfer die Triebkraft reduziert und somit die DFT-Vorhersage unterstützt.

Abbildung 10: Bildungstriebkraft des Ferrits als Funktion der Temperatur in einem 0Cu und einem 1,5Cu Stahl (eigene Darstellung, Datenbasis: im Rahmen des Projektes durchgeführte Berechnung)



Des Weiteren führen Legierungselemente zu einem Herabsetzen der Diffusionsgeschwindigkeit des Kohlenstoffs im α - und γ -Mischkristall, wodurch Phasenumwandlungen grundsätzlich verlangsamt werden. Praktisch alle Legierungselemente verzögern die Perlit- und Bainitbildung und senken somit die kritische Abkühlgeschwindigkeit aber auch die M_s -Temperatur. Die Herabsetzung der kritischen Abkühlgeschwindigkeit hat zur Folge, dass die Martensitbildung erleichtert, aber andererseits die Härtung durch die mit zunehmendem Legierungsgehalt abnehmenden M_s - und M_f -Temperaturen erschwert wird. Die Elemente Chrom und Molybdän verschieben weiters den Beginn der Perlitbildung zu höheren und senken gleichzeitig die Bainitbildung zu niedrigeren Temperaturen, wodurch die Entstehung eines umwandlungsträgen Bereiches begünstigt wird (Bargel und Schulze, 2012, S.441).

5.4.3. Einfluss auf ausgewählte Stahlgüten

Die als problematisch einzustufenden Elemente hängen von der jeweils produzierten Stahlgüte sowie der dafür genutzten Prozesskette ab und können daher nicht generell genannt werden. Klar ist jedoch, dass je edler und je niedriger der Dampfdruck einer Verunreinigung ist, desto schwieriger beziehungsweise unmöglich ist dessen Entfernung.

Um eine klarere und spezifischere Vorstellung über den Einfluss von Begleitelementen zu vermitteln, werden im folgenden Kapitel bereits untersuchte Auswirkungen beschrieben. Für diese Betrachtung werden exemplarisch einige un- und niedriglegierte Stähle herangezogen. Davon folgen Elektroband, Tiefziehgüten, Einsatzstahl und Röhrenstahl meist der integrierten Route mit Hochofen, LD-Konverter (LD) und Sekundärmetallurgie inklusive Vakuumbehandlung im Ruhrstahl-Heraeus-Verfahren (RH) sowie Stranggießen. Das Elektroband muss bei gewissen Begleitelementen besonders niedrige Grenzen einhalten, wie 0,008 m% Molybdän und 0,02 m% Nickel, während diese Grenzen für den Röhrenstahl bei 0,03 m% beziehungsweise 0,2 m% liegen. Die beiden anderen Stähle, Baustahl und Edelstahl für Energiemaschinen, folgen gewöhnlich der Elektrostartroute (Electric Arc Furnace, EAF), bei der der Großteil der eingesetzten Rohstoffe Schrott ist. Der Baustahl wird nach dem Erschmelzen noch im Pfannenofen behandelt und im Strangguss vergossen, jedoch nicht vakuumbehandelt. Bei diesem Produkt sind die meisten Begleitelemente weniger kritisch als bei anderen Güten. Der Stahl für Energiemaschinen hingegen wird mittels Vacuum Oxygen Decarburization-Verfahren (VOD) vakuumbehandelt, in Blöcke abgegossen und bei besonderen Anwendungsfällen für höchste Qualitäten auch mittels Elektroschlackeumschmelzen (ESU) und Vacuum Arc Remelting (VAR) umgeschmolzen. Aufgrund unterschiedlicher Anwendungsfälle und Produktionsrouten bergen Begleitelemente verschiedene Problematiken, welche in weiterer Folge exemplarisch behandelt werden.

Tiefziehgüten

Untersuchungen an einem 0,15C-1,5Si-1,5Mn TRIP-Stahl der ersten Generation zeigen, dass durch das Hinzulegen von 0,5 m% Kupfer die mechanischen Eigenschaften positiv beeinflusst werden können. Der kupferhaltige TRIP-Stahl besitzt eine höhere Zugfestigkeit und Bruchdehnung (817 MPa und 36,4%) im Vergleich zum Kupfer-freien Stahl (727 MPa und 29,2%), der unter den gleichen Bedingungen hergestellt wird. Die beobachtete Erhöhung der Festigkeit und Duktilität wird auf einen erhöhten Anteil an Restaustenit zurückgeführt, der wiederum zu einem ausgeprägteren TRIP-Effekt führt, sowie auf eine Mischkristallverfestigung des Ferrits durch das Kupfer (Im et al., 2000, S.447–453). Durch die Zugabe von 0,4 m% Ni zu dem kupferhaltigen Stahl kann der Restaustenitgehalt um weitere 9,25% erhöht werden, da beide Elemente, insbesondere Nickel, Austenitstabilisatoren sind. Da Nickel auch eine vorbeugende Wirkung gegen die Warmbrüchigkeit hat, kann es in Kombination mit Kupfer sinnvoll zur Entwicklung von kohlenstoffarmen, TRIP-unterstützten kaltgewalzten Stahlblechen mit hervorragenden Eigenschaften eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu führt die Zugabe von Chrom beziehungsweise in Kombination mit Nickel zu dem kupferhaltigen TRIP-Stahl zur Bildung einer großen Menge an Martensit und einer geringen Menge an Restaustenit (8,9% bzw. 8,5%). Dies bewirkt einen Anstieg der Zugfestigkeit, senkt jedoch gleichzeitig die Duktilität, wodurch sich ein mechanisches Verhalten wie bei einem Dualphasenstahl einstellt (Lee et al., 2004, S.737–743; Kim et al., 2003, S.539–544).

Elektroband

Untersuchungen an einem nicht-kornorientierten Si-Stahl zeigen, dass durch geringe Mengen an Zinn (0,1 m%) beziehungsweise Antimon (0,076 m%) die magnetischen Eigenschaften in der Blechebene verbessert werden können (Chang und Huang, 2005, S.918–922). Sowohl Zinn als auch Antimon begünstigen während der Rekristallisation die Ausbildung der (100)[001]- und (110)[001]-Textur und behindern gleichzeitig die Ausbildung der (111)[uvw]-Kornorientierungen. Daraus resultiert im Vergleich zur Basislegierung ein Anstieg der magnetischen Flussdichte B_{50} , wobei der Effekt von Antimon stärker ist. Im Gegensatz dazu zeigt Bor einen negativen Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften, indem es die magnetische Flussdichte reduziert und die Kernverluste erhöht.

Einsatzstähle

Thermogravimetrische Untersuchungen über den Effekt von Verunreinigungselementen auf die Gasaufkohlung an einem 16MnCr5 Einsatzstahl zeigen, dass die hohe Affinität zur Oberflächensegregation der Elemente Zinn und Antimon die Aufkohlungskinetik stark vermindern (Ruck et al., 1996, S.240–246). Die Zeit, die zum Erreichen einer gehärteten Schichtdicke von 0,2 mm nötig ist, steigt bei der mit 610 ppm Zinn dotierten Probe um 60% an. Derselbe Effekt wird bereits mit 94 ppm Antimon erreicht. Die Verlangsamung der Kinetik lässt sich dadurch erklären, dass die Dissoziation von Kohlenmonoxid an der Stahloberfläche nur an unbesetzten Gitterstellen erfolgen kann. Sind diese Stellen jedoch bereits mit anderen Atomen besetzt, wird auch die Dissoziation verlangsamt. Dementsprechend zeigen oberflächenaffine Elemente wie Zinn und Antimon einen verheerenderen Einfluss auf die Kinetik.

Zusammenfassende Betrachtung

Aus werkstofflicher Sicht lässt sich gemäß vorangegangener Recherche schlussfolgern, dass die betrachteten Begleitelemente negative als 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. Die starke Segregationsneigung der Elemente Arsen, Antimon und Zinn zu den Korngrenzen könnte vor allem die Umformbarkeit negativ beeinflussen. IF-Stähle zum Beispiel besitzen sehr geringe Kohlenstoff- ($C < 0,08\%$) und Stickstoffgehalte, wodurch der Schutz der Korngrenzen durch die kleinen Atome wegfällt und es zur Versprödung kommt. Des Weiteren ist das Umformvermögen von Tiefziehgüten stark von der Textur abhängig. Eine hohe senkrechte Anisotropie ($r > 1,25$) bietet einen größeren Widerstand gegen eine Verringerung aus der Blechdicke auf. Diese wird durch Einstellung der {111}-Ebenen in der Blechebene begünstigt. Ähnlich wie die Korngrenzsegregation von Zinn und Antimon im Falle der Elektrobleche die Ausbildung der (100)[001]- und (110)[001]-Textur in der Blechebene positiv beeinflusst, würde dieser Effekt die Tiefzieheigenschaften verschlechtern. Automobilbleche, wie zum Beispiel moderne medium-Mn, TBF und Q&P TRIP-Stähle der dritten Generation, besitzen aufgrund ihrer komplexen Mikrostruktur eine hervorragende Kombination aus Festigkeit und Duktilität. Wie am Beispiel des TRIP-Stahles der ersten Generation gezeigt, haben sowohl Kupfer als auch Nickel einen positiven Effekt auf die finale Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften, während Chrom zu einer Verschlechterung führt. Wie diese Elemente aber auch die anderen Elemente wie Arsen, Antimon und Zinn die Mikrostrukturausbildung neuartiger TRIP-Stähle beeinflussen, lässt sich davon nicht ableiten. Dies zeigt eine Arbeit von Pierce et al. (Pierce et al., 2018, S.454–469), bei der ein Q&P-Stahl einmal mit 1,5 m% Chrom und einmal mit 1,5 m% Ni

untersucht wurde. Dabei stellten sie fest, dass beide Elemente im Vergleich zur Basislegierung den Restaustenitgehalt erhöhen, wobei der Einfluss von Chrom größer ist als jener von Nickel. Der Grund warum Chrom die thermische Stabilität des Austenits in Q&P-Stählen erhöht, ist nicht vollständig bekannt.

Die metallurgischen Aspekte sind in der nachstehenden Tabelle 9 nochmals dargestellt. Der erste Teil zeigt hier die Herstellungsrouten von ausgewählten un- und niedriglegierten Stahlgütern. Hierbei sind die durchlaufenen Aggregate beziehungsweise genutzten Rohstoffe markiert. Anschließend wird im zweiten Teil die Entfernbarkeit einiger als Verunreinigung auftretender Elemente beschrieben. Hierbei stellen die farblichen Kennzeichnungen grün eine gute, gelb eine schlechte beziehungsweise rot keine Möglichkeit zur Entfernung dar. Darüber hinaus bestehen theoretische Möglichkeiten zur Entfernung von Kupfer, Zinn und Arsen aus Stahlschmelzen, welche mit blauer Farbe markiert sind. In der Praxis können die Elemente Kupfer, Zinn, Arsen und Antimon jedoch nicht ohne schwerwiegende Nachteile (Umwelt, Wirtschaftlichkeit usw.) aus der Stahlschmelze entfernt werden. Beim Vergießen können Begleitelemente zu Problemen wie Seigerungen oder Absenken der Liquidustemperatur führen und dadurch diesen Prozess erschweren. Eine Beeinflussung der chemischen Zusammensetzung ist jedoch in diesem Prozessschritt nicht möglich, daher sind die Felder hierbei ausgegraut. Eine Beeinflussung der Rohstoffe ist kaum möglich, hierbei ist lediglich eine sorgfältige Auswahl durchführbar. Der Anteil der weiß gekennzeichneten Elemente in der Spalte Primär (Erz) ist zu gering, um relevante Auswirkungen auf die Chemie des Stahls zu haben.

Tabelle 9: Herstellroute ausgewählter Stahlgüten und Entfernbarekeit von Begleitelementen in metallurgischen Aggregaten (Dworak et al., 2022, S.8)

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 Energemaschinen		x			x	x		x		x	x

Entfernung von Begleitelementen

	Aufbereitungsschritt		Primär			Sekundärmetallurgie			Vergießen		Umschmelzen
	Primär (Erz)	Schrott	Hochofen	LD	EAF	Pfannenofen	RH	VOD	Strangguss	Blockguss	VAR
Kupfer		÷	-	-	-	●	÷	÷			+
Molybdän		-	-	-	-	-	-	-			-
Zinn		÷	-	÷	÷	●	-	-			÷
Chrom	÷	÷	÷	+	+	+	-	-			÷
Arsen	÷	÷	-	-	-	●	+	+			+
Nickel		÷	-	-	-	-	-	-			-
Blei		÷	-	-	-	-	+	+			+
Phosphor	÷	-	-	+	+	-	-	-			-

LD: Linz-Donawitz-Konverter, EAF: Elektrolichtbogenofen, RH: Ruhrstahl-Heraeus-Verfahren, VOD: Vacuum Oxygen Decarburization, VAR: Vacuum Arc Remelting

Grün: Gute Entfernbarekeit (+), Gelb: Schlechte Entfernbarekeit (÷), Rot: Keine Entfernbarekeit (-), Blau: thermodynamisch theoretisch mögliche Entfernbarekeit (●), Weiß: Anteil zu gering für Relevanz, Grau: Bei Vergießen keine Änderung der Chemie möglich

5.5. 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 (World Steel Association, 2022, S.1-42). Gleichzeitig stagnieren die CO₂-Emissionen des österreichischen Stahlsektors auf einem hohen Niveau (UNFCCC, 2022, online) und die Wertschöpfung steigt relativ stark an (Eurostat, 2022, online). 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 Österreichs und dem notwendigerweise verbundenen Beitrag des Sektors. Grundsätzlich hat sich im europäischen Kontext der technologische Dekarbonisierungs-Weg über Nutzung von Wasserstoff und Ersatz von Koks in der Primärproduktion von Roheisen herauskristallisiert, wobei auch dieser Energieträger mit unterschiedlichen Knappheiten verbunden ist. Der Weg über grüne Wasserstoffbereitstellung (Elektrolyse) begrenzt sich deutlich durch inländisch verfügbare erneuerbare Strompotenziale und steht im Wettbewerb mit steigenden Strombedarfen in anderen Bereichen (nicht metallurgische und verarbeitende Industrie und Gewerbe, Mobilität, Raumwärme) (NEFI, 2022, S.1-23). Blauer Wasserstoff (Dampfreformierung) durch Spaltprozesse von konventionellem Erdgas bedingt für Klimaneutralität die Nutzung von Abscheidungs- und langfristigen Speichertechnologien (carbon capture, utilisation and storage, CCUS), deren Potenziale jedoch auch ihre Grenzen aufweisen (z.B. unterirdisch durch ein geltendes Moratorium oder in chemischen Ausgangsstoffen und Kunststoff-Produkten, an deren Lebenszyklusende klimaneutrale Verwertung stehen muss). 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, S.11-78).

Eine Kombination aus diesen Primärproduktionsvarianten kann wirtschaftlich darstellbar sein (CCCA, 2022, S.11-78), weil durch diese Kombination unterschiedliche Knappheiten und Barrieren abgemildert werden. Um Emissionen aber deutlich und rasch zu senken, ergeben sich durch die tendenziell geringeren Vorlauf- und industriellen Skalierungszeiten durch verstärkte Sekundärproduktion von Rohstahl einige Fragestellungen, wie genannte Knappheiten begegnet werden können. 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. Durch das Schmelzen und die Verwertung von Schrott in einem Elektrolichtbogenofen (100% Schrott) können gegenüber der integrierten Methode sowohl die Primärenergie als auch die CO₂-Emissionen um rund 80% gesenkt werden. 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 durch ihren Einsatz eingesparten Energie wertvoll sind, wird durch die derzeit beobachtbare dynamische Entwicklung vieler Mitbewerber im Schrott- und Rezyklierungssektor 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 der 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 der 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 Ansub 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 Instrumenten 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 Schrottverwendung gegen fluktuierende Preise abzusichern, sowie eine Berücksichtigung des Schrottmarktes im kommenden Grenzausgleichsmechanismus der EU, um die Folgen unkoordinierter globaler Politiken abzufedern.

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

6 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. 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.

Die Ergebnisse der Materialflussanalyse zeigen, dass der Anteil von Altschrott an der gesamten Schrottzusammensetzung zunimmt. 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. Das entspricht in etwa der derzeit in Österreich erreichten Quote. Eine verfeinerte Materialflussanalyse, die sich auf relevante Spurenelemente bezieht, erlaubt zielgerichtete Interventionen. Diese genauere Auflösung würde gezielteres Management und potenziell auch gezielte Wertschöpfung ermöglichen, indem erforderliche Legierungselemente substituiert werden können. Weiters gäbe ein detailliertes Modell Aufschluss darüber, welche Elemente die größte Herausforderung darstellen.

Durch immer komplexer werdende Produkte und neue Verbundwerkstoffe wird das Recycling zunehmend anspruchsvoller. 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 ist es möglich, die notwendigen Innovationen zur Steigerung des Stahlrecyclings sinnvoll zu definieren und umzusetzen. Wichtige Aspekte sind hierbei die flächendeckende Erfassung und Aufbereitung von Schrott, die Trennung und Aufbereitung komplexer Verbundwerkstoffe, die Gewährleistung der legierungsspezifischen Trennung und die Digitalisierung der Prozesse in der Stahlrecyclingindustrie sowie im Stahlwerk. Der Einsatz innovativer Technologien zur Aufbereitung und Sortierung sowie deren Kombination kann die Schrottqualität und die Sortierreinheit deutlich verbessern und damit die Schrottverfügbarkeit für den heimischen Verbrauch sichern. Daher ist es wesentlich, die Weiterentwicklung, Erprobung und Integration von

Analysemethoden voranzutreiben, um die im Schrott vorhandenen Verunreinigungen zu identifizieren und sie vor der Beschickung der Öfen wirksam zu entfernen. Sensorgestützte Sortierung, automatisierte Demontage von Abfällen sowie die Digitalisierung der Prozesse stellen vielversprechende Ansätze zur Steigerung des Schrotteinsatzes dar. Hierbei sind vor allem flexible und anpassungsfähige Technologien erforderlich, um schnell auf eine sich rasch ändernde Produktzusammensetzung reagieren zu können.

Weiters sind werkstoffkundliche Untersuchungen zu einem besseren Verständnis der Wirkungsweise der diskutierten Spurenelemente (Begleitelemente) untereinander aber auch auf die Gebrauchseigenschaften von Qualitätsstählen unbedingt notwendig. Die Frage, inwieweit diese unerwünschten Spurenelemente tatsächlich auf die heute üblichen Grenzwerte eingeschränkt werden müssen bzw. die Entwicklung von neuen Stählen, die auf Spurenelemente toleranter sind, stellt hier auch eine zentrale Forschungs- und Entwicklungsaufgabe dar.

Eine Vielzahl an chemischen Elementen, die durch Schrott in die Stahlschmelze eingeschleppt werden, gilt als unerwünschtes Spurenelement. Diese sind oft schwer oder gar nicht metallurgisch entfernbar, wie beispielsweise Kupfer und Molybdän. Bei diesen Elementen ist daher eine Anreicherung in vor allem niedrigqualitativen Schrotten zu erwarten, weshalb eine intensiviertere Forschung einerseits zu deren Verhalten in der Stahlschmelze als auch die Auswirkungen im fertigen Produkt von Nöten ist. Durch die genannten Elemente kann es zu Problemen im Gießprozess durch abgesenkte Liquidustemperaturen kommen sowie zu veränderten Oberflächeneigenschaften. Auch hier ist die Entwicklung von neuen Stahlgütern die toleranter auf Spurenelemente sind eine zentrale F&E-Aufgabe.

Die Abschätzung der direkten und indirekten volkswirtschaftlichen Effekte des erhöhten Schrotteinsatzes mittels Szenarien-Analyse auf Basis zu erhebender Betriebskosten und Investitionsbedarfe für erhöhten Schrotteinsatz in Kombination mit klimaneutralen Optionen der Primärproduktion steht auch hier als zentrales Forschungsthema im Vordergrund wobei als Arbeitshypothese die Klimaneutrale Entwicklung im Stahlbereich durch verstärkte Schrottverwendung nicht nur insgesamt effizienter und damit günstiger, sondern auch widerstandsfähiger sein sollte, da Lieferketten diversifizierter gestaltet werden können.

7 Ausblick und Empfehlungen

Das Erarbeiten einer „Landkarte“ hinsichtlich Schrottqualitäten und -verbringung sowie das Durchführen eines Technologiescreenings stellt eine ideale Basis dar zum Setzen weiterer F&E-Aktivitäten für ein verstärktes Stahlrecycling. Es braucht national geförderte Leuchtturmprojekte mit Einbindung aller Player entlang der Schrottverarbeitungskette zur Demonstration einer gesteigerten Schrottwertschöpfung. Dies umfasst die Entfernung von Störstoffen (unerwünschter Begleitelemente bzw. Verunreinigungen) gekoppelt mit einem effizienteren Schrottplatzmanagement (Charakterisierung, Sortierung) sowie die Verarbeitung zu Qualitätsstahlprodukten. Nur so kann die Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit in Österreich langfristig gesichert werden.

Zusammengefasst bedarf es umfangreicher, interdisziplinärer und geförderter F&E-Projekte, welche folgende Schwerpunkte im industriellen Maßstab abdecken (d.h., mit einem Technologiereifegrad TRL am Projektende von 8 – System-technisch fertig entwickelt):

- Verbesserte Analysemethoden und Sortiertechnologien am Schrottplatz (beim Schrottaufbereiter und im Stahlwerk) und Erhöhung des Durchsatzes bzw. der Analysengeschwindigkeit von Methoden zur spektroskopischen Schrottcharakterisierung
- Kopplung optischer und spektroskopischer Schrottanalyse
- Anlagentechnische Adaptierung der Schrottaufbereitung zur Erhöhung/Optimierung der Abtrennung nichtmetallischer Komponenten (z.B. Kunststoff) und zur Auftrennung von Eisen- und Nichteisenmetallen
- Verbesserte Datenverfügbarkeit
- Maßnahmen zum Schließen der Lücke bei der Verwertung von End-of-Life Fahrzeugen in Österreich (als Teil eines umfangreichen Verwertungskonzeptes im Rahmen eines Förderprojektes)
- Detaillierte Erforschung des metallurgisch-werkstofftechnischen Verhaltens von Spurenelementen im Stahl
- Übergeordnetes Projektziel einer gesteigerten Schrottwertschöpfung, d.h., Kopplung von Methoden zur Entfernung von Störstoffen mit einem effizienteren Management des Schrottchargiermixes für die nachfolgende Verarbeitung zu Qualitätsstahlprodukten
- Kommunikationsaktivitäten entlang der Wertschöpfungskette (Schrottaufbereiter/Anlagenbauer/Stahlerzeuger) und Erhöhung der öffentlichen Akzeptanz mit dem Aufzeigen der Notwendigkeit, Maßnahme umzusetzen, um das Recycling von Schrott zu erhöhen und den Export zu minimieren

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Primärroute der Stahlproduktion adaptiert nach (Europäische Kommission, 2013, S.9, S.368).....	11
Abbildung 2: Sekundärroute der Stahlproduktion adaptiert nach (Europäische Kommission, 2013, S.420).....	11
Abbildung 3: Stand der Technik bei der Schrottverwertung im Stahlwerk und Unsicherheitsfaktoren (eigene Darstellung)	13
Abbildung 4: Vereinfachtes MFA-System zur Bewertung der Stahl- und Schrottströme übernommen aus (Dworak et al., 2022, S.106072). Prozesse mit Rechtecken innerhalb symbolisieren sogenannte Lager mit folgender Bedeutung: In-Use: in Verwendung befindliche Stahlprodukte (z.B. in Infrastruktur und Gebäuden verbauter Stahl, Stahl in Transportmitteln (z.B. Automobile, Züge), Stahlprodukte (Werkzeug, Haushaltsutensilien) usw.); Losses WM: Verlust in der Abfallwirtschaft (z.B. Deponien, Dissipation)	16
Abbildung 5: Qualitative Material Pinch-Analyse, Szenario 1: Schrottverfügbarkeit EU (Dworak et al., 2022, S.4).....	23
Abbildung 6: Qualitative Material Pinch-Analyse, Szenario 2: Neuschrott AT, Altschrott EU (Dworak et al., 2022, S.4)	23
Abbildung 7: Qualitative Material Pinch-Analyse, Szenario 3: Neuschrott AT, Altschrott AT (Dworak et al., 2022, S.5)	24
Abbildung 8: Schrottbedarf und Schrottherkunft für die Stahlerzeugung in Österreich im Jahr 2017 (eigene Darstellung, Datenbasis: im Rahmen des Projektes durchgeführte Stakeholder-Interviews) .	25
Abbildung 9: Einfluss der Begleitelemente auf die Stabilität von Ferrit (eigene Darstellung, Datenbasis: im Rahmen des Projektes durchgeführte Berechnung)	34
Abbildung 10: Bildungstriebkraft des Ferrits als Funktion der Temperatur in einem 0Cu und einem 1,5Cu Stahl (eigene Darstellung, Datenbasis: im Rahmen des Projektes durchgeführte Berechnung)	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schrottklassen in der EU gemäß einer Spezifikation der EFR nach (European Ferrous Ferrous Recovery and Recycling Foundation, 2007, S.4-7)	12
Tabelle 2: Qualitätsklassen basierend auf max. tolerierbaren Anteil von Begleitelementen (Dworak und Fellner, 2021, S.105692).....	16
Tabelle 3: Beeinflussung ausgewählter Elemente auf Produkteigenschaften mit +: Positiver Einfluss; -: Negativer Einfluss; Nein: Kein Einfluss; +/-: Positiver oder negativer Einfluss (Daigo et al., 2021, S.498–505).....	20
Tabelle 4: Schrottbedarf und Schrottherkunft für die Stahlerzeugung in Österreich im Jahr 2017 (Dworak et al., 2022, S.6)	25

Tabelle 5: Relevante Begleitelemente in der Stahlproduktion mit der Datenbasis aus eigener Stakeholder-Interviews (eigene Darstellung, Datenbasis: im Rahmen des Projektes durchgeführte Stakeholder-Interviews)	27
Tabelle 6: Grenzwerte für ausgewählte Stahlprodukte (k.A.: keine Angabe) mit der Datenbasis aus eigener Stakeholder-Interviews (eigene Darstellung, Datenbasis: im Rahmen des Projektes durchgeführte Stakeholder-Interviews)	27
Tabelle 7: Anteil an Begleitelemente in verschiedenen Schrottfractionen (k.A.: keine Angaben) mit der Datenbasis aus eigener Stakeholder-Interviews (eigene Darstellung, Datenbasis: im Rahmen des Projektes durchgeführte Stakeholder-Interviews)	28
Tabelle 8: Nicht-technologische Maßnahmen zur Erhöhung des Stahlrecyclings (einschließlich einer Einschätzung ihrer Wirksamkeit, +: mehrstimmig geeignete Maßnahme, -: mehrstimmig nicht geeignete Maßnahme, (Dworak et al., 2022, S.7))	31
Tabelle 9: Herstellroute ausgewählter Stahlgüten und Entfernbarkeit von Begleitelementen in metallurgischen Aggregaten (Dworak et al., 2022, S.8)	39
Tabelle 10: Beschreibung der im Projekt verwendeten Daten	52
Tabelle 11: Beschreibung der im Projekt generierten Daten	53

Literaturverzeichnis

Europäische Kommission: Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production. Luxembourg (Scientific and technical research series, JRC 69967). Online verfügbar unter <http://bookshop.europa.eu/en/best-available-techniques-bat-reference-document-for-iron-and-steel-production-pbLFNA25521/>, 2013.

World Steel Association (Hg.): Steel Statistical Yearbook 2020 concise version, 2020.

European Ferrous Recovery and Recycling Foundation (Hg.): EU-27 steel scrap specification, 2007.

World Steel Association (Hg.): World Steel in Figures 2020, 2020.

Hatayama H., Daigo I., Matsuno Y., Adachi Y.: Outlook of the world steel cycle based on the stock and flow dynamics. In: *Environmental science & technology* 44 (16), S.6457–6463, 2010.

Broadbent C.: Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. In: *Int J Life Cycle Assess* 21 (11), S.1658–1665, 2016.

López C., Peña C., Muñoz E.: Impact of the Secondary Steel Circular Economy Model on Resource Use and the Environmental Impact of Steel Production in Chile. In: *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 503 (1), S.12024, 2020.

Zhu Y., Syndergaard K., Cooper D. R.: Mapping the Annual Flow of Steel in the United States. In: *Environmental science & technology* 53 (19), S.11260–11268, 2019.

Fellner J., Laner D., Warrings R., Schustereder K., Lederer J.: Potential impacts of the EU circular economy package on the utilization of secondary resources. In: *Detritus* 2 (1), S.16–23, 2018.

Daehn K. E., Serrenho A. C., Allwood J.: Finding the Most Efficient Way to Remove Residual Copper from Steel Scrap. In: *Metall and Materi Trans B* 50 (3), S.1225–1240, 2019.

Daigo I., Tajima K., Hayashi H., Panasiuk D., Takeyama K., Ono H., Kobayashi Y., Nakajima K., Hoshino T.: Potential Influences of Impurities on Properties of Recycled Carbon Steel. In: *ISIJ Int.* 61 (1), S.498–505, 2021.

Daehn K. E., Cabrera Serrenho A., Allwood J. M.: How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling? In: *Environmental science & technology* 51 (11), S.6599–6606, 2017.

Daigo I., Fujimura L., Hayashi H., Yamasue E., Ohta S., Huy T. D., Goto Y.: Quantifying the Total Amounts of Tramp Elements Associated with Carbon Steel Production in Japan. In: *ISIJ Int.* 57 (2), S.388–393, 2017.

Igarashi Y., Daigo I., Matsuno Y., Adachi Y.: Estimation of the Change in Quality of Domestic Steel Production Affected by Steel Scrap Exports. In: *ISIJ Int.* 47 (5), S.753–757, 2007.

EUROFER: European Steel in Figures 2021, 2021.

Dworak S., Fellner J.: Steel scrap generation in the EU-28 since 1946 – Sources and composition. In: *Resources, Conservation and Recycling* 173, S.105692, 2021.

Dworak S., Rechberger H., Fellner J.: 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. In: *Resources, Conservation and Recycling* 179, S.106072, 2022.

Baccini P., Brunner P. H.: *Metabolism of the Anthroposphere*. Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg, 1991.

Cullen J. M., Allwood J. M., Bambach M. D.: Mapping the global flow of steel: from steelmaking to end-use goods. In: *Environmental science & technology* 46 (24), S.13048–13055, 2012.

Linnhoff B., Hindmarsh E.: The pinch design method for heat exchanger networks. In: *Chemical Engineering Science* 38 (5), S.745–763, 1983.

Bargel H.-J.; Schulze G. (Hg.): *Werkstoffkunde*. Berlin, Heidelberg. Springer, 2012.

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

AEA (Hg.): *Stromstrategie 2040: Österreichs Weg in eine klimaneutrale Energiezukunft*, 2022.

WKO (Hg.): *Im Wettbewerb um die Zukunft Klimapolitische Perspektiven für den Beitrag der österreichischen Industrie zur Treibhausgasneutralität*, 2019.

Dworak S., Fellner J., Beermann M., Häuselmann M., Schenk J., Michelic S., Cejka J., Sakic A., Mayer J., Steininger K.: *Stahlrecycling – Potenziale und Herausforderungen für innovatives und nachhaltiges Recycling*. In: *Österr Wasser- und Abfallw.*, 2022.

Sauter A. G.: *Strategien zur Schließung von Stoffkreisläufen am Beispiel der Stahl- und Zinkindustrie – ein konzeptioneller Beitrag zur Ressourceneffizienz in der Metallindustrie*. Universitätsbibliothek der TU Clausthal, 2022.

Material Economics (Hg.): *Preserving value in EU industrial materials - A value perspective on the use of steel, plastics, and aluminium*, 2020.

Hiebel M., Nühlen J.: *Technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Faktoren von Stahlschrott (Zukunft Stahlschrott)*, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.), Onlinefassung der Kurzstudie im Auftrag der Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV), 2016.

European Steel Technology Platform (ESTEP) (Hg.): *Clean Steel Partnership Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA)*, 2021.

TENOVA (Hg.), Online: tenova.com/technologies/intelligent-scrap-yard-management-isym, zuletzt geprüft am 10.10.2022, 08:00.

Stahl+Eisen (Hg.), Online: Primetals und Sicon wollen Schrottplätze digitalisieren. Online verfügbar unter www.stahleisen.de/2021/11/11/primetals-und-sicon-wollen-schrottplaetze-digitalisieren/, zuletzt geprüft am 10.06.2022, 10:20.

EUROFER: European Steel in Figures 2018 - covering 2008-2017, 2018.

Huellen M., Schrade C., Wilhelm U., Zulhan Z.: EAF-Based Flat-Steel Production Applying Secondary Metallurgical Processes, 2006.

Toi A., Sato J., Kanero T.: Analysis of Tramp Element in Iron Scraps. In: *Tetsu-to-Hagane* 83 (12), S.850–855, 1997.

Daigo I., Goto Y.: Comparison of Tramp Element Contents of Steel Bars from Japan and China. In: *ISIJ Int.* 55 (9), S.2027–2032, 2015.

Nakamura S., Kondo Y., Nakajima K., Ohno H., Pauliuk S.: Quantifying Recycling and Losses of Cr and Ni in Steel Throughout Multiple Life Cycles Using MaTrace-Alloy. In: *Environmental science & technology* 51 (17), S.9469–9476, 2017.

Oda T., Daigo I., Matsuno Y., Adachi Y.: Substance Flow and Stock of Chromium Associated with Cyclic Use of Steel in Japan. In: *ISIJ Int.* 50 (2), S.314–323, 2010.

Mannanal S. J., Dehnhardt S., Eickmeyer T., Fußholz K., Gesser A., Tiedke S.: On-line bulk composition analysis of steel scrap using PGNAA (SCRAP PROBE). On-line bulk composition analysis of steel scrap using PGNAA (SCRAP PROBE); Europäische Kommission. Luxembourg (EUR, EUR-26180-EN). Online verfügbar unter <https://bookshop.europa.eu/en/on-line-bulk-composition-analysis-of-steel-scrap-using-pgnaa-scrap-probe--pbKINA26180/>, 2013.

Ono K., Ichise E., Suzuki R. O., Hidani T.: Elimination of copper from the molten steel by NH₃ blowing under reduced pressure. In: *Steel Research* 66 (9), S.372–376, 1995.

Sasabe M., Harada E., Yamashita S.: Removal of Copper from Carbon Saturated Molten Iron by Using FeCl₂. In: *Tetsu-to-Hagane* 82 (2), S.129–134, 1996.

Bell S., Davis B., Javaid A., Essadiqi E.: Final Report on Effect of Impurities in Steel, 2006.

Uchino H., Nagasaki C., Kaga M., Seo S.-J., Asakura K., Shibata K.: Effects of C and P on surface hot shortness of steel due to Cu mixed from steel scrap. In: *Journal of Advanced Science* 13 (3), S.260–264, 2001.

Mintz B.: The Influence of Composition on the Hot Ductility of Steels and to the Problem of Transverse Cracking. In: *ISIJ Int.* 39 (9), S.833–855, 1999.

Coutsouradis D., Leroy V., Greday T., Lecomte-Beckers J.: Review of hot shortness problems in copper-containing steel. In: *ATB Métallurgie*, 23 (3), 7-1-7/24, 1983.

Leroy V., Defourny J., D'Haeyer R.: Effects of tramp elements in flat and long products : Mechanical working (rolling mills). Hg. v. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, 1995.

Sasaki N., Uchida Y., Miki Y., Matsuno H.: Fundamental Study of Sn Removal from Hot Metal by NH₃ Gas Blowing. In: *ISIJ Int.* 54 (8), S.1807–1812, 2014.

Iron and Steel Society (Hg.): 54th Electric Furnace Conference proceedings: : Dallas Meeting, December 9 - 12, 1996. Electric Furnace Conference, 54. Dallas (Electric Furnace Conference Proceeding), 1996.

Herman J., Leroy V.: Influence of Residual Elements on Steel Processing and Mechanical Properties. In: *Iron and Steelmaker* 23, S.35–43, 1996.

Seah M. P.: Adsorption-induced interface decohesion. In: *Acta Metallurgica* 28 (7), S.955–962, 1980.

Grabke H. J.: Surface and grain boundary segregation on and in Iron and steels. In: *ISIJ Int.* 29 (7), S.529–538, 1989.

Im D.-B., Lee C. G., Kim S.-J., Park I.-M.: Effect of Cu on Formability of Low Carbon TRIP-Aided High Strength Cold-Rolled Steel Sheets. In: *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials (South Korea)* (38), S.447–453, 2000.

Lee C. G., Kim S.-J., Lee T.-H., Oh C.-S.: Effects of Tramp Elements on Formability of Low-carbon TRIP-aided Multiphase Cold-rolled Steel Sheets. In: *ISIJ Int.* 44 (4), S.737–743, 2004.

Kim S.-J., Gil Lee C., Lee T.-H., Oh C.-S.: Effect of Cu, Cr and Ni on mechanical properties of 0.15 wt.% C TRIP-aided cold rolled steels. In: *Scripta Materialia* 48 (5), S.539–544, 2003.

Chang S., Huang W.: Texture Effect on Magnetic Properties by Alloying Specific Elements in Non-grain Oriented Silicon Steels. In: *ISIJ Int.* 45 (6), S.918–922, 2005.

Ruck A., Monceau D., Grabke H. J.: Effects of tramp elements Cu, P, Pb, Sb and Sn on the kinetics of carburization of case hardening steels. In: *Steel Research* 67 (6), S.240–246, 1996.

Pierce D. T., Coughlin D. R., Clarke K. D., Moor E. de, Poplawsky J., Williamson D. L., Mazumder B., Speer J. G., Hood A., Clarke A. J.: Microstructural evolution during quenching and partitioning of 0.2C-1.5Mn-1.3Si steels with Cr or Ni additions. In: *Acta Materialia* 151, S.454–469, 2018.

World Steel Association (Hg.): World Steel Association Statistics, 2022.

UNFCCC, Online: GHG Inventory Data: Contribution of sectors and gases. United Nations Framework Convention on Climate Change. Verfügbar unter: www4.unfccc.int/sites/brdi/Pages/GHGInventory.aspx, zuletzt geprüft am 15.10.2022, 08:30.

Eurostat (Hg.), Online: Value added at factor cost: Annual detailed enterprise statistics for industry (NACE Rev. 2, B-E) [sbs_na_ind_r2]. Verfügbar unter: ec.europa.eu/eurostat/, zuletzt geprüft am 18.10.2022, 08:00.

NEFI (Hg.): Projekt-Zwischenergebnisse. New energy for industry, 2022.

CCCA (Hg.): Untersuchung der nachhaltigen Verwertung von Kohlenstoff aus der Methanpyrolyse, Projektbericht ans BMK, 2022.

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
APT	Atomsonde (atom probe tomography)
As	Arsen
AT	Österreich (Austria)
bzw.	beziehungsweise
CCUS	Carbon capture, usage and storage
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DFT	Density Functional Theory
d.h.	da heißt
DMP	Data Management Plan
EAF	Elektrolichtbogenofen (electric arc furnace)
EFR	European Ferrous Recovery and Recycling Federation
etc.	et cetera
ESU	Elektroschlackeumschmelzen
ETS	EU-Emissionshandelsystem (emission trading system)
EU	Europäische Union
F&E	Forschung und Entwicklung
k.A.	Keine Angabe
LD	Linz-Donawitz-Konverter
LIBS	Laserinduzierte Plasmaspektroskopie (laser-induced breakdown spectroscopy)
MFA	Materialflussanalyse (material flow analysis)
Max.	maximal
Mio.	Million
Mo	Molybdän
MPA	Material Pinch Analysis
Ni	Nickel
P	Phosphor
Pb	Blei

PGNAA	Prompte-Gamma-Neutronenaktivierungsanalyse (prompt gamma neutron activation analysis)
RH	Ruhrstahl-Heraeus-Verfahren
Sn	Zinn
t	Tonnen
TEM	Transmissionselektronenmikroskopie
THG	Treibhausgas
TKD	Transmission Kikuchi Diffraction
TRL	Technology readiness level (Technologiereifegrad)
usw.	und so weiter
v.a.	vor allem
VAR	Vacuum Arc Remelting
VOD	Vacuum Oxygen Decarburization
WKO	Wirtschaftskammer Österreich
XRD	Röntgendiffraktion
XRF	Röntgenfluoreszenz (X-ray fluorescence spectroscopy)
z.B.	zum Beispiel

9 Anhang

9.1. Data Management Plan (DMP)

1: Datenerstellung und Dokumentation

In Tabelle 10 sind die genutzten Daten, in Tabelle 11 die generierten Daten aufgelistet.

Tabelle 10: Beschreibung der im Projekt verwendeten Daten

Beschreibung	Typ	Art	Quelle	Zugang	Link
Monthly deliveries on the EU (28) market by consumer industry (Questionnaire 2/73), yearly aggregated, 2008-2019	Numerisch	Historische Zeitreihen (historische Daten)	WKO	Eingeschränkt, auf Nachfrage	-
Materialeffizienz für Produkte / Sektoren	Numerisch	Wissenschaftliche Veröffentlichung	Cullen, 2012 (SI)	öffentlich	https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ess302433p
Europäische Altschrottraten, Zusammensetzung des Schrotts	Numerisch	Wissenschaftliche Veröffentlichung	Dworak et al. 2022 (SI)	öffentlich	https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106072
Begleitelementgehalt	Numerisch	Wissenschaftliche Veröffentlichung	Dworak et al., 2021	öffentlich	https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105692

Tabelle 11: Beschreibung der im Projekt generierten Daten

ID	Beschreibung	Typ	Art	Verantwortlich	Zugang
Erg_AP2	Ergebnisse AP2: Rückblick und Prognose Stahlschrottaufkommen Österreich	Numerisch	Historische und zukünftige Zeitreihen (generierte Daten)	Projektpartner TU Wien	nicht öffentlich
Befrag_AP2	Befragung von Stakeholdern: Schrottbedarf und Verfügbarkeit, Schrottlogistik, Begleitelemente in Schrott und Stahlprodukten	Numerisch, qualitativ	Schrott-Jahresmengen, Ablaufbeschreibung in der Logistik, max. Anteile von Begleitelementen in Schrottqualitäten und Stahlprodukten	Projektpartner JOANNEUM RESEARCH	Einzeldaten nicht öffentlich; aggregierte und anonymisierte Daten im Projektendbericht
Befrag_AP4	Befragung von Stakeholdern: Innovationsbedarf für erhöhten Schrotteinsatz in der Stahlproduktion	Qualitativ	Beschreibung von Technologien und Anforderungen für verbesserte Schrottcharakterisierung und -sortierung	Projektpartner JOANNEUM RESEARCH	Anonymisierte Informationen im Projektendbericht

2: Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

Die Stakeholder-Interviews enthalten Informationen und Daten, die teilweise der mit den Stakeholdern vereinbarten Geheimhaltung unterliegen. Daher wurden die Daten im Rahmen der Auswertungen anonymisiert, aggregiert und ausschließlich in Rücksprache mit den Stakeholdern geteilt und veröffentlicht.

3: Datenspeicherung und -erhalt

Die verwendeten und generierten Daten werden von jedem Projektpartner sicher in deren Infrastruktur gespeichert und gesichert (regelmäßiges Backup in den für die Institution gewöhnlichen Intervallen). Jeder Partner ist für die Sicherheit und Sicherung bei ihm gespeicherten (und benutzen) Daten verantwortlich.

4: Wiederverwendbarkeit der Daten

Um die mit den Stakeholdern vereinbarte Geheimhaltung einzuhalten, wurden die Daten bei den Projektpartnern gespeichert und archiviert. Auf Anfrage wurden anonymisierte Daten unter den Projektpartnern geteilt, solange es die Geheimhaltungsvereinbarungen nicht verletzte. Es wurde vereinbart, die Daten auch über Projektende hinaus bei Bedarf zwischen den Projektpartnern auf Anfrage zu teilen.

A large, light blue geometric shape, resembling a right-angled triangle or a trapezoid, is positioned on the right side of the page. It has a vertical right edge and a horizontal top edge, with a diagonal line connecting the top-left corner to the bottom-right corner.

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)