

TEXTE

81/2022

## Kurzfassung

# OptiMet

## Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie - Substitution von Primärrohstoffen durch optimiertes legierungsspezifisches Recycling

### von:

PD Dr. Raatz, Dr. Seidel  
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V. (HZDR) - Helmholtz-Institut Freiberg für Ressour-  
centechologie, Freiberg

Prof. Tuma, Dr. Thorenz, Dr. Helbig, Prof. Reller  
Universität Augsburg - Resource Lab, Augsburg

Prof. Faulstich, Ch. Joachimsthaler  
Technische Universität Dortmund - Fakultät Raumplanung - Lehrstuhl Ressourcen- und Energie-  
systeme, Dortmund

S. Steger, W. Hagedorn, Dr. Bickel, Prof. Liedtke

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (WI) - Abteilung Kreislaufwirtschaft und  
Abteilung Nachhaltiges Produzieren und Konsumieren, Wuppertal

### Herausgeber:

Umweltbundesamt



TEXTE 81/2022

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für  
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und  
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3717 31 349 0  
FB000811

Kurzfassung

## **OptiMet**

Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie -  
Substitution von Primärrohstoffen durch Verminderung  
des Downcyclings

von

PD Dr. Raatz, Dr. Seidel

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V. (HZDR) - Helm-  
holtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie, Freiberg

Prof. Tuma, Dr. Thorenz, Dr. Helbig, Prof. Reller  
Universität Augsburg - Resource Lab, Augsburg

Prof. Faulstich, Ch. Joachimsthaler  
Technische Universität Dortmund - Fakultät Raumplanung -  
Lehrstuhl Ressourcen- und Energiesysteme, Dortmund

S. Steger, W. Hagedorn, Dr. Bickel, Prof. Liedtke  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (WI) -  
Abteilung Kreislaufwirtschaft und Abteilung Nachhaltiges  
Produzieren und Konsumieren, Wuppertal

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://www.twitter.com/umweltbundesamt)

### Durchführung der Studie:

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V. (HZDR); Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF) mit seinem Konsortium  
Chemnitzer Straße 40  
09599 Freiberg

### Abschlussdatum:

April 2021

### Redaktion:

Fachgebiet FG III 2.2 - Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie  
Christian Lehmann

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, August 2022

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

### **Kurzbeschreibung: OptiMet**

Das durch das Umweltbundesamt geförderte Projekt befasst sich mit der Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie in Hinblick auf die Substitution von Primärrohstoffen, die im Recyclingprozess zur Verdünnung unerwünschter Begleitelemente beim Recycling eine wesentliche Rolle spielen. Das damit einhergehend Downcycling soll mittels innovativer Sortiertechniken (Kamera-/Sensorsysteme) vermindert und der Recyclingprozess von metallischen Legierungen durch eine höhere Trennschärfe deutlich verbessert werden.

Der Fokus der Untersuchungen liegt in diesem Projekt auf der Untersuchung eines legierungsspezifischen Recyclings von Stahl-, Aluminium-, Kupfer- und Zinkschrotten. Hier soll der Vergleich verschiedener Schrottfractionen vor bzw. nach innovativen Analyse- bzw. Sortier- und Separier-Prozessen neue Erkenntnisse liefern. Darüber hinaus werden definitorische Grundlagen sowie Steuerungsgrößen für Up- und Downcycling und Regeln für sortenarmes Design erarbeitet.

Auf Grundlage der Analyseergebnisse werden politische Empfehlungen zur besseren Erschließung bisher nicht genutzter, hochwertiger Metallpotenziale erarbeitet. Zu den Bewertungsmaßstäben gehören die Einsparpotenziale von primären Rohstoffen und damit Treibhausgasemissionen sowie die Kostenstruktur für die Herstellung von möglichst hochwertigen Legierungen aus Rezyklaten.

Eine erfolgreiche, das heißt mit minimalen Downcycling-Prozessen „belastete“ Bereitstellung von sekundären Rohstoffen erfordert eine umfassende Wissensbasis über die wissenschaftlichen Hintergründe von Downcycling, bestehende Recyclingstrukturen und verwendete Sortiertechniken, technologische Potenziale, metallurgische Prozesssimulationen und Bewertungsansätzen von Recyclingprozessen, die im Rahmen dieses Projektes entwickelt und genutzt werden.

## 1 Hintergrund

In den vergangenen 150 Jahren hat der Bedarf an Metallen für Schlüsselsektoren wie die Energie-, Verkehrs-, Produktions- und Kommunikationsbranche stark zugenommen. Neben Massemetallen wie Eisen, Aluminium und Kupfer werden zunehmend auch Legierungselemente wie Magnesium, Silizium und Mangan unverzichtbar, da sie wichtige Materialfunktionen für spätere Anwendungen erfüllen. Technische Innovationen in den Bereichen Mobilität, Energiewandlung und -Speicherung sowie bei Baukonstruktionen erfordern scheinbar immer wieder neue Funktionsmaterialien und Legierungselemente. Mittlerweile bildet sich hier nahezu das gesamte Periodensystem ab.

Das Thema Recyclingfähigkeit spielt allerdings bei der Entwicklung neuer Werkstoffe bisher kaum eine Rolle. Der für das spätere qualitativ hochwertige Recycling gegenläufige Trend der Diversifizierung von Legierungen hält weiter an und führt in dessen Folge unmittelbar zum Downcycling. Gleichzeitig wird weniger als die Hälfte des Metallbedarfs in Europa durch eigene Reserven gedeckt. Europa ist somit sehr stark von den weltweit verteilten Vorkommen und damit politischen Verhältnissen abhängig. Qualitativ hochwertiges bzw. funktionales Recycling ist also die einzige Möglichkeit, sowohl der Abhängigkeit als auch der Knappheit von metallischen Ressourcen entgegenzuwirken und die derzeit bestehenden Verluste zu minimieren.

Doch das Recycling von Legierungen stößt an Grenzen, da die teilweise benötigten Zusätze vor allem aber die durch den globalen Handel und die verschiedensten Herstellungsprozesse in den Kreislauf kommenden nicht benötigten Begleitelemente meist in so niedriger Konzentration und komplex verteilter Form vorliegen, dass sich eine Abtrennung im metallurgischen Prozess äußerst schwierig gestaltet und sich mit den bisherigen Aufbereitungsverfahren wirtschaftlich nur selten darstellen lässt. Durch die Kreislaufführung kommt es dann sukzessive zu einer unerwünschten Anreicherung dieser Begleitelemente (wie beispielsweise Kupfer im Stahl) in der Schmelze. Diesem ungewollten Qualitätsverlust, dem sogenannten Downcycling, wird aktuell durch die Zugabe von hohen Mengen an Primärmaterial, als Verdünnungsmittel für störende Elemente bei der Herstellung neuer Legierungen, begegnet.

Ziel des Vorhabens ist nun, den Anteil an zur Verdünnung benötigten Primärrohstoffen durch intelligente d.h. sehr viel legierungsspezifischere Sortierung vor dem eigentlichen Aufbereitungsprozess (z.B. Pyrometallurgie) deutlich zu reduzieren und über diesen Weg auch die Legierungselemente einer Wiederverwendung zuzuführen.

## 2 Vorhaben

Das durch das Umweltbundesamt geförderte Vorhaben befasst sich mit der Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie in Hinblick auf die Substitution von Primärrohstoffen und Erhöhung des funktionserhaltenden Recyclings. Dabei liegt der Fokus auf der Untersuchung der Möglichkeiten eines legierungsspezifischen Recyclings von Stahl-, Aluminium-, Kupfer- und Zinkschrotten. Hier soll die Untersuchung verschiedener Schrottfractionen vor bzw. nach innovativen Sortier- und Trennprozessen neue Erkenntnisse liefern. Darüber hinaus werden Steuerungsgrößen für Re- und Downcycling sowie Regeln für sortenarmes Design bestimmt. Auf Grundlage der Analyseergebnisse werden Empfehlungen zur besseren Erschließung bisher nicht genutzter, hochwertiger Metallpotenziale erarbeitet. Zu den Bewertungsmaßstäben gehören die Einsparpotenziale bei Rohstoffen und Treibhausgasemissionen sowie die Kostenstruktur für die Herstellung von Legierungen aus Rezyklaten.

Eine erfolgreiche, das heißt mit minimalen Downcycling-Prozessen „belastete“, Bereitstellung von sekundären Rohstoffen erfordert eine umfassende Wissensbasis über bestehende Recyclingstrukturen, technologische Potenziale, metallurgische Prozesssimulationen und Bewertungsansätze, die im Rahmen dieses Projektes entwickelt und genutzt werden.

### 3 Vorgehensweise

Das Projekt wurde von Wissenschaftler\*innen aus vier Forschungseinrichtungen bearbeitet. Die Koordinierung oblag dem HZDR und hier dem Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie (HIF). Insgesamt wurde das Projekt in fünf Arbeitspakete (AP) unterteilt:

#### **AP1 Downcycling – ein Überblick (Universität Augsburg)**

Im AP1 werden die definatorischen Grundlagen zum Thema Downcycling von Legierungen geschaffen. Bisher gibt es zwar den Begriff aber keine Hinterlegung dafür.

#### **AP2 Downcycling – Status Quo und Ausblick (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie/ TU Dortmund)**

Im AP2 werden Daten zum Status Quo des Aufkommens und der Verwertungswege von Legierungsgruppen auf deutscher, europäischer und globaler Ebene zum gegenwärtigen Stand und für das Jahr 2030 erhoben. Darauf aufbauend werden die zu erwartenden dissipativen Verluste und mögliche ökologische und ökonomische Effekte, die durch das Vermeiden solcher Verluste entstehen, bestimmt.

#### **AP3 Innovative Analyse- und Sortiertechniken – Durchführung von Sortier- und Trennverfahren (HZDR, Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie)**

Zur Beurteilung der Eignung unterschiedlicher Sortierverfahren für handelsübliche, gemischte Schrotte wurden innovative Analyse- bzw. Sortiertechniken mithilfe von XRF, XRT, LIBS, NAA und LIF untersucht und hinsichtlich der Erkennung der Elementverteilung sowie -Konzentration in verschiedensten Schrottfractionen verglichen. Auf Basis der Versuche werden die Eignung, Chancen und Risiken innovativer Sortiertechnologien dargestellt und anwendungsorientierte Lösungen auch mit Hilfe von metallurgischen Simulationstools erarbeitet. Die innovativen Sortiertechniken werden im Anschluss mit am Markt verfügbaren Trenntechniken kombiniert und die prozentuale Verbesserung der Sortier- und Trenneffizienz dargestellt.

#### **AP4 Auswertung (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie)**

Die Ergebnisse von AP1 bis AP3 werden im AP4 zusammengeführt. Aufbauend auf dem Vergleich der Sortier- sowie vor und nachgelagerten Trenntechniken werden am Beispiel der idealen Prozesskette die damit verbundenen Ressourcenschonungs- und Primärrohstoff-Einsparpotentiale ermittelt.

#### **AP5 Empfehlungen (TU Dortmund)**

Abschließend werden Handlungsoptionen aufgezeigt, die eine Übertragung der ermittelten Potenziale in die Praxis ermöglichen. Dabei werden wirtschaftliche, politische und rechtliche Faktoren berücksichtigt. Mithilfe einer Wirkungsanalyse werden die Optionen und Maßnahmen bewertet und finale Empfehlungen abgeleitet.

Durch das interdisziplinäre Team wurden die Schlussfolgerungen gemeinsam mit Vertreter\*innen aus Politik, Verbänden, Wissenschaft und Wirtschaft aus verschiedenen Blickwinkeln beleuchtet und die Ergebnisse im vorliegenden Bericht zusammengestellt.

## 4 Zusammenfassung der Ergebnisse

### 4.1 AP 1 Downcycling – ein Überblick

#### Definition des Begriffs „Downcycling“

Der Begriff „Downcycling“ ist eine Kombination aus den Worten „down“ (englisch für „hinab“) und „cycling“ (englisch für „im Kreislauf führen“). Der Begriff beschreibt also eine nach unten gerichtete Kreislaufführung, ohne jedoch festzulegen was genau mit der Abwärtsrichtung gemeint ist. Im Kontext der Kreislaufwirtschaft ist der Begriff Downcycling eine Abwandlung des Begriffs „Recycling“, welcher beispielsweise im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) definiert ist.

Als Synthese aus den Verwendungen des Begriffes „Downcycling“ in der Literatur ergibt sich im Projekt „OptiMet“ folgende Arbeitsdefinition: **Unter Downcycling ist das Phänomen der „Verringerung der Qualität von aus Abfällen aufbereiteten Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen gegenüber der ursprünglichen Qualität“ zu verstehen.**

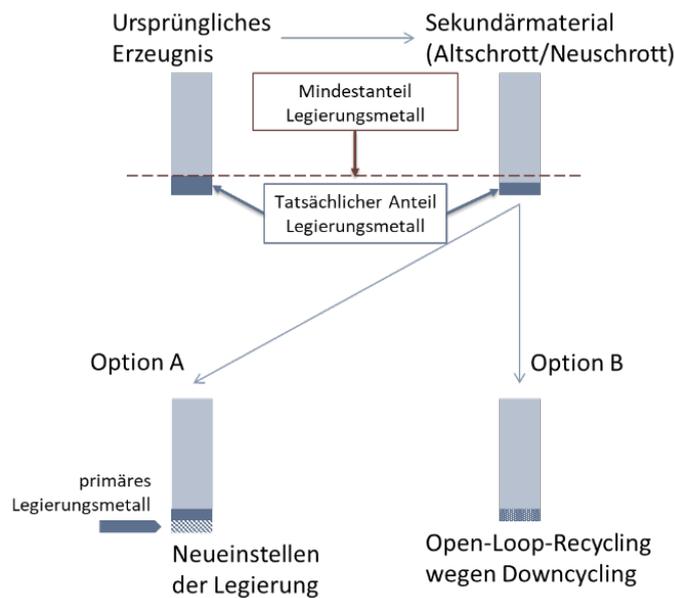
Es kann bei der Verringerung der Erzeugnisqualität zwischen thermodynamischem, funktionalem und ökonomischem Downcycling unterschieden werden:

- ▶ **Thermodynamisches Downcycling** liegt vor, wenn für die Aufbereitung eines Erzeugnisses, Materials oder Stoffes aus Abfällen aus Sekundärmaterialien mehr thermodynamischer Aufwand in Form von Energie, Wärme, Arbeit oder Zuschlagsstoffen benötigt wird als für die Herstellung des gleichen Erzeugnisses, Materials oder Stoffes durch reines Umschmelzen.
- ▶ **Funktionales Downcycling** liegt vor, wenn das mögliche Einsatzspektrum eines aus Abfällen aufbereiteten Erzeugnisses, Materials oder Stoffes weniger Zwecke abdeckt als das Einsatzspektrum des gleichen, durch reines Umschmelzen hergestellten Erzeugnisses, Materials oder Stoffes.
- ▶ **Ökonomisches Downcycling** liegt vor, wenn der spezifische Gebrauchswert (üblicherweise Handelspreis) eines aus Abfällen aufbereiteten Erzeugnisses, Materials oder Stoffes niedriger liegt als der Wert des gleichen, durch reines Umschmelzen hergestellten Erzeugnisses, Materials oder Stoffes.

Downcycling hängt außerdem mit dem ebenfalls problematischen Phänomen der Dissipation zusammen, wobei die Begriffe nicht bedeutungsgleich sind. Während die Legierungen des Hauptmetalls durch Downcycling an Qualität verlieren, beschreibt Dissipation den Verlust von Legierungselementen, zum Beispiel als Folge des Recyclingprozesses.

Auch die Gründe für Downcycling sind verschieden. Downcycling kann durch Verdünnung, Kontamination durch Störstoffe (Abbildung 4-1), Überangebot von Sekundärmaterial oder durch Produktdesign bedingt sein.

**Abbildung 4-1: Handlungsmöglichkeiten beim Downcycling durch Verdünnung**



Schematische Darstellung, Quelle: eigene Darstellung, Universität Augsburg

Downcycling ist insbesondere dann problematisch, wenn die Verringerung der Qualität der Sekundärmaterialien dazu führt, dass erhöhte Umweltauswirkungen zu erwarten sind. Dies ist der Fall, wenn a) eine hohe Menge an Primärrohstoffen benötigt wird, um die erforderlichen Material-Qualitäten unter Verwendung von Sekundärrohstoffen wenigstens einigermaßen sicherzustellen, b) ein hoher Bedarf an Energie bzw. Exergie zur Verarbeitung der Sekundärrohstoffen erforderlich ist oder c) Funktionsmetalle (Legierungsbestandteile) wie Kupfer, Zinn oder Kobalt als Störstoffe aufwändig, eben durch Verdünnung und nicht durch Rückgewinnung, „entfernt“ werden. Dies bedingt den unwiederbringlichen Verlust von Legierungselementen zum Beispiel über die Schlacke oder den Flugstaub.

### Quantifizierung von Downcycling

Für eine Quantifizierung von Downcycling ist festzustellen, dass es kein allgemeingültiges Maß für die „Qualität“ eines Materials gibt, auf das sich eine Definition beziehen kann. Qualitätsangaben sind stattdessen immer abhängig von der Funktion und dem Anwendungsbereich. Unabhängig davon haben wir uns im Projekt „OptiMet“ bei den Berechnungen auf eine Basislinie (sogenannte Nulllinie) verständigt. Diese beschreibt den Primärrohstoffbedarf im pyrometallurgischen Prozess, wenn man aus einer Eingangslegierung genau die gleiche Qualität bzw. Ursprungslegierung wiederherstellen möchte (reines Umschmelzen). Dementsprechend sollte der Vergleich immer an der Prozessstufe im Materialkreislauf stattfinden, an dem Primärrohstoffe direkt mit dem Einsatz von Sekundärrohstoffen in Konkurrenz stehen. Es kristallisierte sich daher die thermodynamische bzw. exergetische Bewertung als am geeignetsten für die Quantifizierung des Downcyclingeffektes heraus.

### Recycling-Kompatibilitätsmatrix

Ob eine im Abfallstrom enthaltene Verunreinigung ein Störstoff oder ein gewünschtes Legierungsmetall ist, hängt vom Verhalten des Elements im Recyclingprozess und im darin hergestellten Werkstoff ab. Im Recyclingprozess ist vor allem entscheidend, ob das Element in der Metallphase verbleibt, oder aufgrund seiner Reaktivität in die feste Schlackephase oder die Gasphase

abgeschieden und damit vom Hauptmetall separiert wird. Im Fall eines Verbleibs in der Metallphase ist eine Separierung im Recyclingprozess schwierig, was im Fall von verschlechterten Materialeigenschaften wiederum den Anwendungsbereich des Sekundärmaterials einschränkt.

**Tabelle 4-1: Kompatibilität der Legierungselemente mit Werkstoffen der Legierungskategorien**

Element	Stahl	Al-Leg.	Cu-Leg.	Zn-Leg.
Fe	Basis	✘	-	-
Al	✓	Basis	✓	✓
Cu	✘!	✘	Basis	✓
Zn	✓	(✓)	✓	Basis
Mg	-	✓	-	✓
Si	-	✘	-	-
Ti	-	✘	-	-
Cr	✓	✘	-	-
Mn	✓	✘	-	-
Ni	✘	-	✓	-
Mo	✘	-	-	-
Nb	✓	-	-	-
V	✓	-	-	-
W	✘	-	-	-
Co	✘	-	-	-
Sn	-	-	✓	-
Pb	-	-	✘!	-
Bi	-	-	✘!	-

✓: Im üblichen Recyclingprozess abtrennbares Element. (✓): Nur teilweise abtrennbares Element. ✘: Nicht abtrennbares Element. -: Kein Legierungselement dieser Legierungsklasse. !: Störstoff dieser Legierungsklasse. Basis: Basismetall der Legierungsklasse.

In der Literatur wurde untersucht, inwieweit Abfallströme für verschiedene metallurgische Aufbereitungsprozesse separiert werden sollten. Hierbei zeigt sich, dass für das Aluminium-Recycling alle anderen Metalle separiert werden müssen, während beispielsweise Kupfer und Zink im Recycling Kupfer-, Blei-, und Zinklegierungen sehr gut aufnehmen können. Zinklegierungen können in der Kupfer-, der Stahl- und der Zinkroute verarbeitet werden.

Zusammenfassend können Kompatibilitäten für das Recycling mit Bezug auf Störstoffe angegeben werden (Tabelle 4-1).

Für Stahl ist insbesondere Kupfer als Störstoff zu nennen. Bei Aluminium sind lediglich Magnesium und zum Teil Zink als Schrotte im Recyclingprozess separierbar. Im Kupferrecycling wird besonders auf den Bleieintrag durch bleihaltige Messinglegierungen und die Vermeidung des

Eintrags von Bismut in Leitungskupfer geachtet. Die üblichen Legierungselemente für Zink lassen sich gut im Recycling separieren.

### Beispiel Aluminium

In dieser Zusammenfassung wird auch in den folgenden Kapiteln nur auf ausgewählte Ergebnisse und speziell Aluminium eingegangen.

Grundsätzlich werden bei Aluminium Knet- und Walzlegierungen (meist verkürzt nur Knetlegierungen genannt) gegenüber Gusslegierungen unterschieden.

Typische Knetlegierungen sind: 1100 für Lebensmittelverpackungen („Alu-Folie“), 1350 für elektrische Leiter, 3003 für Wärmetauscher, 3004 für Getränkedosen (wobei der Öffnungsclip meist aus 5182 besteht), 5052 für Gasbehälter, 6063 für Fahrzeugrahmen, 7050 und 7075 für Luftfahrtanwendungen (Hatayama et al. 2006). Die mittlere Zusammensetzung ausgewählter Knetlegierungen ist in Tabelle 4-2 angegeben.

**Tabelle 4-2: Mittlere Gewichtsanteile der Legierungselemente für ausgewählte Aluminiumlegierungen in Prozentwerten (The Aluminium Association 2015). Aluminium macht den auf 100% fehlenden Massenanteil aus.**

Nr.	Kommentar	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
1235	Haushalts-Alufolie	0,65 (Si+Fe) <sup>1</sup>		0,05	0,05	0,05	-	0,1	0,06
3003	Häufigste 3xxx-Legierung	0,6	0,7	0,13	1,25	-	-	0,1	-
5182	Verschluss von Aludosen	0,2	0,35	0,15	0,38	4,5	0,1	0,25	0,1
6063	Häufigste 6xxx-Legierung	0,6	0,35	0,1	0,1	0,68	0,1	0,25	0,1
1350	Leiteraluminium	0,1	0,4	0,05	0,01	-	0,01	0,05	-
3004	Behälter Aludosen	0,3	0,7	0,25	1,25	1,05	-	0,25	-
5083	Schiffbau (Platten)	0,4	0,4	0,1	0,7	4,45	0,15	0,25	0,15
6061	Zweithäufigste 6xxx-Legierung	0,6	0,7	0,28	0,15	1,0	0,21	0,25	0,15
8011	Alternative Alufolie	0,7	0,8	0,1	0,2	0,05	0,05	0,1	0,08

Die häufigsten Legierungselemente für Aluminium sind Magnesium, Silizium, Titan, Chrom, Mangan, Eisen, Kupfer und Zink. Weitere Legierungsmetalle können Nickel, Silber, Bor, Bismut, Gallium, Lithium, Blei, Zinn, Vanadium oder Zirkonium sein (The Aluminium Association 2015). Zusätzlich gilt, dass üblicherweise je nicht explizit aufgeführtem Element maximal 0,05% enthalten sein dürfen, und in der Summe solche Elemente nicht mehr als 0,15 Prozent Gewichtsanteil ausmachen dürfen. Explizite Störstoffe, die gar nicht in Aluminiumlegierungen enthalten sein dürfen, sind nicht bekannt.

Wichtigste Anwendung für Aluminiumgusslegierungen, die insgesamt höhere Gehalte an Legierungselementen enthalten, sind Motorblöcke im Fahrzeugbau (Nakajima et al. 2010). Downcycling könnte für Aluminium in Zukunft ein noch größeres Problem werden, wenn die Nachfrage nach Gusslegierungen für Motorblöcke von Verbrennungsmotoren sinkt, weil diese aktuell eine große Senke für Legierungsmetalle darstellen.

<sup>1</sup> Der Massenanteil von Silizium und Eisen beträgt zusammen 0,65%.

Derzeit besteht die weltweite Nachfrage nach Aluminiumlegierungen zu etwa einem Drittel aus 6xxx Legierungen. Daneben sind die Legierungsgruppen 1xxx, 3xxx, 5xxx und 8xxx wichtig, etwa ein Viertel der Nachfrage sind Gusslegierungen.

Altschrotte von Aluminiumlegierungen werden überwiegend für die Herstellung von Gusslegierungen eingesetzt, dagegen Primäraluminium überwiegend für Knetlegierungen. Aluminiumschrotte werden typischerweise entweder im Remelting-Prozess oder im Refining-Prozess verarbeitet (Cullen and Allwood 2013). Remelter (<10% Legierungselemente) erzeugen dabei Walz- und Extrusionsprodukte. Es gelten strenge Anforderungen an die verwendeten Sekundärmaterialien, weshalb hauptsächlich Neuschrotte, bzw. in ihrer Zusammensetzung gut definierte Produktionsabfälle, verwendet werden und nur wenig Altschrott. Refiner (<20 Prozent Legierungselemente) haben geringere Qualitätsanforderungen und erhalten daher den überwiegenden Teil der Altschrotte.

Speziell für den Fahrzeugsektor wird untersucht, inwieweit hier über eine bessere Separation der Altschrotte höhere Recyclingraten möglich wären, da die Knetlegierungen überwiegend als Gusslegierungen, und damit nicht funktionserhaltend, recycelt werden.

## 4.2 AP2 Status quo und Prognose

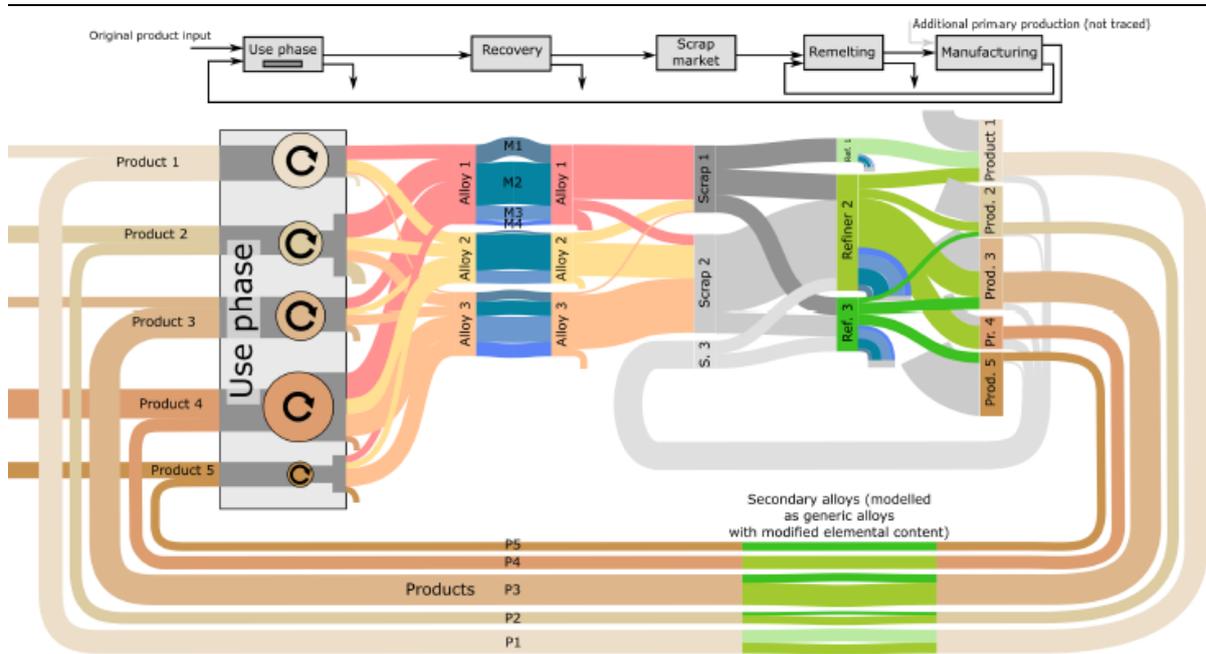
In diesem Arbeitspaket geht es um das Bestimmen des Aufkommens und der Verwertungswege von Stahl-, Aluminium-, Kupfer- und Zinklegierungen als Status Quo und Prognose bis 2030. Die Daten werden auf nationaler, europäischer und globaler Ebene betrachtet. Zunächst werden allgemeine Mengengerüste bestimmt, die dann die Kalkulation der erwarteten dissipativen Verluste durch Downcycling sowie mögliche ökologische und ökonomische Effekte durch dessen Vermeidung gestattet.

Da Daten zum Schrottaufkommen in sehr unterschiedlichen Qualitäten und häufig gar nicht vorliegen, war ein Ziel des Projektes, für einige ausgewählte Legierungsarten eine vergleichbare Datenbasis zu schaffen. Dazu ist das Vorgehen über die drei geographischen Ebenen (regional, EU, global) einheitlich. Ausgangspunkt sind die Schrottmengen an Abfallströmen (Abbildung 4-2), die als Input in die Verwertungsanlagen gehen, wie Altfahrzeuge oder Bau- und Abbruchmaterialien.

Recherchierte Metallanteile, wie sie bspw. im UBA-Bericht „ReSek“ (2018) enthalten sind, lassen dann auf die Metallanteile von Stahl, Aluminium, Kupfer und Zink schließen. Während Neuschrotte bzw. Produktionsabfälle meist gut definierte und damit recht einfach zu recycelnde Abfallströme sind, sind sogenannte Mischschrotte wie Elektronikschrott sehr komplex zusammengesetzt, mit mittlerweile nahezu allen Elementen des Periodensystems als Legierungsbestandteile. Dies gestaltet das Recycling und die Rückgewinnung wertvoller Metalle sehr schwierig. So

wird Germanium beispielsweise aus solchen Stoffströmen zu weniger als 1 Prozent wiedergewonnen. Mengenmäßig machen die Mischschrotten etwa 30-40 Prozent des Gesamtaufkommens aus.

**Abbildung 4-2: Eine Definition für legierungsspezifische Stoffströme in einem System**



Quelle: Nakamura et al. 2017

Für die Quantifizierung der Hauptmetalle wird ein 5-stufiger Ansatz verwendet:

1. Bestimmen des Angebots, der Nachfrage und des Schrottaufkommens der Hauptmetalle des Status Quo
2. Definieren der relativen Anteile (Umrechnungsfaktoren) der Hauptlegierungen am Gesamtmetallverbrauch
3. Berechnung der quantitativen Mengen an Hauptlegierungen
4. Ableitung der Prognose für das Jahr 2030 anhand bestehender Szenarien
5. Verifizierung der Ergebnisse über Experteninterviews und entsprechende Anpassungen

**Beispiel Aluminium**

Rohmetall ist als raffiniertes Aluminium definiert, welches z.B. in Form von Blöcken und Barren gehandelt wird. Es umfasst damit sowohl Primär- als auch Sekundäraluminium. Das Angebot an Aluminium lag in Deutschland für das Jahr 2016 bei 3.954 kt, in Europa bei 13.586 kt und weltweit bei 88.726 kt. Die Nachfrage ergibt sich unter Berücksichtigung der Exporte des Rohmetalls und des Außenhandels des Halbzeugs sowie der Neuschrotte der Halbzeugherstellung. Letztere umfassen die Neuschrotte, Krätze, Schlacken und Verluste durch bspw. Stäube. Dabei wurden nur Ströme betrachtet, die die Schmelzwerke verlassen. Zusätzlich gibt es Neuschrotte, die werksintern wieder eingeschmolzen werden. Im Bericht ist der Anteil an Neuschrotten ausgewiesen, der aufgrund ihrer hohen Sortenreinheit direkt wieder eingeschmolzen werden kann. Solche Schrotte entstehen bei nachgelagerten Werken, die bspw. Halbzeug verarbeiten, und werden zum Teil wieder direkt an die vorgelagerten Schmelzwerke transportiert, wo sie verwendet werden. Als Ausnahme wurden für Deutschland Lagerveränderungen berücksichtigt. Diese wurden vor allem genutzt, um eine Angleichung an die veröffentlichten Daten der WVMetalle zu

schaffen. Insgesamt ergibt sich daraus die Nachfrage für Deutschland für das Jahr 2016 von 3.350 kt, für Europa von 11.544 kt und weltweit von 77.901 kt.

Die Ergebnisse zeigen, wie erwartet, die Importabhängigkeit von Deutschland beim Aluminium. So wird in Deutschland etwa doppelt so viel Aluminium in Rohform importiert, als im Inland produziert wird. Zudem hat Deutschland einen ausgeprägten Außenhandel beim Halbzeug mit einem leichten Exportüberschuss. Auch auf europäischer Ebene ist eine Importabhängigkeit zu erkennen. Etwa die Hälfte des unverarbeiteten Aluminiums wird importiert. Der europäische Außenhandel von Halbzeug zeigt einen leichten Importüberschuss und ist im Vergleich zum deutschen Außenhandel geringer. Das ist darauf zurückzuführen, dass der deutsche Außenhandel sich zu einem Großteil auf den europäischen Markt bezieht. Der europäische Außenhandel wiederum berücksichtigt lediglich den außereuropäischen Handel.

Gleichzeitig besteht das Schrottaufkommen sowohl aus Knet- als auch Gusslegierungen. Eine Verteilung nach Legierungsgruppe ist nur für die Knetlegierungsschrotte sinnvoll. Es wird, wie bei der Unterscheidung der Nachfrage, von einem Verhältnis 70% zu 30% zwischen Schrotten aus Knetlegierungen und Gusslegierungen ausgegangen.

Gemäß der in diesem Bericht vorgenommenen Berechnungen steigt die deutsche Nachfrage nach Aluminium von 3.350 kt im Jahr 2016 auf 3.830 kt bis 4.170 kt im Jahr 2030. Das entspricht einer Zunahme der Nachfrage zwischen 14,3% und 24,5%. Eine ähnliche Entwicklung ist auf europäischer Ebene zu beobachten: Hier steigt die Aluminiumnachfrage von 11.544 kt (2016) auf 13.560 kt bis 15.355 kt im Jahr 2030. Das entspricht einer Steigung von 17,5% bis 33% über den betrachteten Zeitraum von 14 Jahren. Der Anstieg der Nachfrage ist dabei auf europäischer Ebene leicht stärker als auf deutscher Ebene. Auf globaler Ebene ist ein Anstieg von 77.901 kt (2016) auf 101.178 kt bis 122.826 kt im Jahr 2030 zu erwarten. Das Ergebnis gleicht einem prozentualen Anstieg von 29,9% bis 57,7%, der sich über den Zeitraum von 14 Jahren verteilt. Demnach wächst die globale Aluminiumnachfrage wesentlich stärker als auf deutscher und europäischer Ebene. Auf globaler Ebene ist gemäß des IAIs für 2030 eine Aluminiumnachfrage von 120.000 kt zu erwarten, was in dem hier berechneten Intervall der

globalen Aluminiumnachfrage liegt. Die Studie der OECD hat für das Jahr 2060 eine globale Aluminiumnachfrage von 210.000 kt zum Ergebnis. Unter Berücksichtigung der errechneten Ergebnisse würde ein Anstieg der globalen Aluminiumnachfrage zwischen 71% und 108% verteilt über einen Zeitraum von 30 Jahren folgen. Das entspricht einem jährlichen Wachstum von 1,8% bis 2,5%.

Ein wesentlicher Aspekt ist in diesem Zusammenhang die Betrachtung des verfügbaren Aluminiumschrotts, der in die Sekundärproduktion fließt. So flossen auf globaler Ebene im Jahr 2014 etwa 26.000 kt Aluminiumschrott zurück in die Aluminiumproduktion. Auf europäischer Ebene waren es etwa 3.700 kt. Dabei bleibt jedoch offen, wie viel Aluminiumschrott darüber hinaus zur Verfügung stand und ungenutzt blieb. Es kann abgeleitet werden, dass global im Jahr 2030 33.778 kt an Aluminiumschrott in die Produktion zurückgeführt werden. Hinzukommen 10.877 kt, die nicht dem Recycling zugeführt werden. Insgesamt kann also von einem globalen Schrottaufkommen von Aluminium von 44.655 kt im Jahr 2030 ausgegangen werden. Im Jahr 2016 lag das Schrottaufkommen bei 23.707 kt. Das entspricht einem Wachstum von etwa 88%. Für die europäische Ebene steht hier keine Prognose zur Verfügung.

Die zukünftige Entwicklung der Aluminiumnachfrage und des Schrottaufkommens sind von vielen Faktoren abhängig. Dazu gehört auch die technologische Entwicklung einzelner Sektoren, da diese sehr eng mit dem Materialbedarf verknüpft sind.

Die Anwendungsbereiche mit hoher Relevanz für Aluminium sind nach wie vor die Fahrzeug- und Luftfahrtindustrie sowie der Schiffbau. Gründe hierfür sind die Leichtigkeit gepaart mit der Schadenstoleranz, Korrosionsbeständigkeit, Steifheit und Festigkeit. Von Bedeutung sind hier vor allem Scandium-haltige Aluminiumlegierungen.

Die Zugabe von Scandium ermöglicht das Schweißen anstelle des Nietens des Werkstoffs in der Verarbeitung. Anzunehmende Bedeutung für den Flugzeugrahmenbau gewinnen auch neuartige Aluminium-Lithium-Legierungen. Die geringere Dichte und verbesserte Materialeigenschaften führen zu gewünschten Gewichtsreduktionen. Ein weiterer erheblicher Faktor im Transportsektor hinsichtlich des legierungsspezifischen Aluminiumbedarfs ist die Etablierung der Elektromobilität im PKW Bereich. Derzeit kommen Gusslegierungen insbesondere für Verbrennungsmotoren von PKWs zum Einsatz. Sollte sich die Elektromobilität durchsetzen, sinkt der Bedarf an Verbrennungsmotoren und somit sinkt der Bedarf an Gusslegierungen.

### **Quantifizierung Downcycling**

Für das Basismetall Aluminium werden hier nur Knetlegierungen angeführt. Die Grundlage bildet die Publikation „International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys“ (International Aluminium Association, 2015) und das sogenannte Teal Sheet. Dieses Dokument enthält eine Liste mit 528 verschiedenen Knetlegierungen und ihrer chemischen Zusammensetzung bzw. den Grenzwerten für bestimmte chemische Elemente, die nicht überschritten werden dürfen. Für Gusslegierungen und ihre Zusammensetzung liegen diese Daten nicht vor.

Folgenden Elemente werden als prozentuale Konzentration darin abgebildet: Si, Fe, Cu, Mn, Mg, Cr, Ni, Zn, Ti, Ag, B, Bi, Ga, Li, Pb, Sn, V, Zr. Für die chemischen Elemente Si, Fe, Cu, Mn, Mg, Cr, Zn und Ti sind Spannbreiten oder Grenzwerte für fast alle 528 Legierungen angegeben. Andere chemischen Elemente wie z.B. Pb, Ni oder Ga werden nur bei wenigen Legierungen verwendet und dementsprechend auch nur bei wenigen Legierungen im Teal Sheet als Grenzwert oder Spannweite benannt.

Bestimmte Legierungselemente kommen nur in bestimmten spezifischen Legierungen vor, sind dort allerdings zum Teil in hohen Konzentrationen vorgesehen. So ist z.B. in den 38 Legierungen der 8xxx-Gruppe in insgesamt fünf Knetlegierungen Lithium enthalten. In vier davon ist die Konzentration mit 2,25% bis 3,8% sehr hoch.

Um die Downcycling-Effekte abschätzen zu können, ist neben der Abschätzung der chemischen Zusammensetzung der Schrottmengen die Festlegung von typischen Ziel-Legierungen notwendig, deren Herstellung mittels der HSC-Sim-Simulationssoftware des HZDR (HIF) dargestellt wurde. Nach Literaturrecherchen und internen Diskussionen wurden für den Bereich der Aluminium-Knetlegierungen für die mengenmäßig bedeutsamsten Legierungsgruppen (6xxx, 1xxx, 3xxx und 5xxx) jeweils zwei Legierungen ausgewählt und unterstellt, dass aus jeweils 50% der Schrottmenge je Legierungsgruppe eine der beiden Legierungen erzeugt werden. Bei den restlichen Legierungsgruppen (2xxx, 4xxx, 7xxx und 8xxx) wurde je eine Legierung ausgewählt. Die Simulationsrechnung zeigt somit die notwendige Menge an Legierungsmetallen und Rohaluminium an, die zusätzlich zum Schrott hinzugegeben werden müssen, um z.B. aus einem Schrottmisch der 8xxx-Gruppe die Legierung 8011 herzustellen.

Dies ist der Nachverdünnungseffekt und damit ein Teil des Downcyclings. Weitere Aspekte des Downcyclings sind die Verluste an Legierungsmetallen, die im Schrott enthalten sind, aber nicht Teil der Ziellegierung sind. Diese nicht notwendigen Metalle können Störstoffe sein, die eine Nachverdünnung erforderlich machen oder als gebundene Streumetalle in den neuen Knetlegierungen verloren gehen. Ein weiterer Aspekt sind Metallverluste durch den Übergang dieser Metalle in die Schlacke oder Stäube im Rahmen des Herstellungsprozesses.

Die stärksten Nachverdünnungseffekte zeigen sich in den Simulationsrechnungen bei der Herstellung der Ziellegierungen der 2xxx-Gruppe (2007) und der 7xxx-Gruppe (7020), während es für die Ziellegierungen 1350, die beiden 3xxx-Legierung sowie die beiden 5xxx-Legierungen die geringsten Nachverdünnungseffekte gibt.

Als Resultat der Simulationsrechnungen für die regionale Ebene „Deutschland“ ergeben sich bei der Herstellung der verschiedenen Ziellegierungen in Summe Verdünnungseffekte in Höhe von 179,7 kt bis 239,5 kt (je nach Vermischungsgrad), das jeweils fast vollständig durch primäres oder Rohaluminium bestimmt wird (174,1 kt - 232,2 kt). An Legierungselementen müssen vor allem Magnesium (1,74 kt - 2,32 kt), Roheisen (1,20 kt - 1,60 kt), Silizium (0,59 kt - 0,79 kt), Mangan (0,57 kt - 0,76 kt) und Zink (0,48 kt - 0,64 kt) hinzulegiert werden. Kupfer (0,39 kt - 0,52 kt), Chrom (0,24 kt - 0,32 kt) und Titan (0,21 kt - 0,28 kt) sind weitere relevante Legierungsmetalle die aufgrund von Verdünnungseffekten hinzulegiert werden müssen. Das bedeutet, dass bei einem vermischten Schrotteinsatz von 173,4 kt bis 231,2 kt unter Maßgabe der hier verwendeten Annahmen durch Nachverdünnung insgesamt 353,0 kt - 470,7 kt Aluminiumknetlegierungen hergestellt werden würden. Dies entspräche 15 % bis 20,0% der tatsächlich in Deutschland nachgefragten Menge an Aluminium-Knetlegierungen.

Ein weiteres Ergebnis ist, dass sich die Verteilung der Nachfrage nach Legierungsgruppen bis 2030 nur wenig ändert; entsprechend ändert sich auch die Schrottzusammensetzung und damit die Mengen an Ziellegierungen kaum. Somit wächst die Mengen an Primäraluminium und Legierungsmetallen, die aufgrund der Nachverdünnung hinzugegeben werden müssen, parallel zur Schrottmenge und entsprechend damit einer Menge von 217,7 kt - 236,2 kt bei einer vermuteten 30% Vermischung der Schrottmenge bzw. 290,3 kt - 314,9 kt bei einer 40% Vermischung. Die prozentuale Zusammensetzung zwischen Hüttenaluminium und Legierungsmetallen bleibt unverändert. Somit wird geschätzt, dass auch 2030 die Nachverdünnung zu 97% aus Hüttenaluminium bestehen wird.

Neben Verdünnungseffekte ergeben sich auch Verluste an Legierungsmetallen, die zwar im Schrott enthalten, in der Ziellegierung aber nicht benötigt werden und entweder im Basis-Metall sogar als Störelement gebunden bleibt oder aber in Schlacken und Stäuben zum Teil verloren gehen. Diese Menge beläuft sich 2016 für Deutschland auf einer Summe von 0,38 kt bis 0,51 kt an Legierungselementen, von denen vor allem Bismut (0,11- 0,14 kt), Zinn (0,08- 0,10 kt), Blei (0,05 - 0,06 kt) und Magnesium (0,05 - 0,07 kt) zu nennen sind. Im Jahr 2030 werden sich die Verluste parallel zur Menge an Schrott auf Summen von 0,39 kt bis 0,42 kt (30% Vermischung) bzw. 0,52 kt bis 0,56 kt (40% Vermischung) erhöhen. Die Zusammensetzung dieser Verluste nach einzelnen Legierungsmetallen ist sehr ähnlich der im Jahr 2016.

### **Umweltauswirkungen**

Beim Einsatz von 173,4 bzw. 231,2 kt Aluminiumschrott in Deutschland 2016, aus der 353,0 kt - 470,7 kt neue Knetlegierungen hergestellt werden, ergibt sich ein kumulierter Rohstoffaufwand von 2.872 kt bis 3.829 kt. Da der Großteil der Verdünnungseffekte Primäraluminium betrifft, ist auch der Anteil des Primäraluminiums an den Umwelteffekten mit 2.416 kt bis 3.221 kt (oder 84%) entsprechend hoch. Der hohe Energiebedarf der Aluminiumherstellung, und damit auch der Treibhausgasemissionen (THG), führt dazu, dass der Anteil des Primäraluminiums bei den Umweltindikatoren KEA und Carbon Footprint sogar höher ist als beim KRA (93% bzw. 97%).

Bis zum Jahr 2030 erhöhen sich mit den höheren Mengen an Schrotteinsatz und damit auch höheren Nachverdünnungseffekten und Verlusten ebenfalls die negativen Umwelteffekte. Der KRA steigt bei einem Vermischungsgrad von 30% auf 3,58 bis 3,89 Mio. t, der KEA auf 55,64 Mio. bis 60,25 Mio. GJ und der Carbon Footprint auf 5,63 bis 6,11 Mio. t in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Bei einem 40% Vermischungsgrad erhöhen sich die Umwelteffekte auf 4,78 Mio. t bis 5,18 Mio. t für den

KRA. Der KEA steigt auf 74,05 bis 80,33 Mio. GJ und der Carbon Footprint auf 7,51 bis 8,15 Mio. t in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Die prozentuale Verteilung der Anteile des Primäraluminiums und der Legierungsmetalle ändert sich nur sehr geringfügig, da die Gewichtung der Ziellegierungen in 2030 sich ebenfalls nur sehr geringfügig unterscheidet. In 2030 ist der Anteil des Primäraluminiums an allen drei Indikatoren noch etwas ausgeprägter als in 2016, allerdings liegen diese Zuwächse im Nachkommabereich.

### **4.3 AP3 Analyse innovativer Aufbereitungs- und Sortiertechniken, Durchführung von Sortierversuchen**

Die Gewinnung von möglichst sortenreinem Schrott, insbesondere in Bezug auf die entsprechenden Legierungselemente, ist zur Verminderung des Downcyclings, zur Einsparung von Primärrohstoffen und zur Reduzierung der Umweltauswirkungen eine Grundvoraussetzung. Neben sinnvollen Sammelsystemen oder einem seit längerem in Diskussion stehendem Produktpass ist dafür ein tiefes Verständnis von Sortier- und Analysetechniken erforderlich. Im Projekt „OptiMet“ wird darum über einen Vergleich verschiedener heute am Markt befindlicher analytischer Messmethoden (Kamera-/Sensorsysteme etc.) und deren Kombinationen ermittelt, welche Analyse- bzw. Sortierverfahren in Kombination mit vor- oder nachgelagerten Trennverfahren (Magnetscheidung, Wirbelschicht, Druckluft etc.) bei gemischten Schrottfractionen Sinn machen, um hohe Qualitäten an Sekundärrohstoff zu sichern und unerwünschtes Downcycling Stück für Stück zu reduzieren. Die analytischen und technologischen Grenzen mit Hinblick auf die Vielzahl an Legierungselementen werden dabei herausgearbeitet.

Das AP 3 fokussierte sich somit auf zwei Schwerpunkte: Zum einen werden verschiedene Sortiermethoden zur Charakterisierung von Mehrstofflegierungen von vier unterschiedlichen Hauptmetalle, die durch das UBA vorgegeben wurden, bewertet und untereinander verglichen werden. Dabei kommen die Analysemethoden Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF), Röntgentransmissionsanalyse (XRT), laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) und Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) zum Einsatz. Aufgrund unserer Einschätzung, dass auch die bildgebende Reflektanzspektroskopie (HSI) in verschiedenen Wellenlängenbereichen für eine bessere Charakterisierung der Elementzusammensetzung von Materialströme nutzbar ist, wurde diese ebenfalls betrachtet. Um es bereits hier vorwegzunehmen: Diese, dem eigentlichen Trennprozess vorgelagerten Sortierprozesse bzw. Analysemethoden sind entscheidend für die Verbesserung des Trennfaktors bzw. für die Qualität des Gesamtprozesses. Die dem Sortierprozess vor- oder nachgelagerten Trennverfahren wie Magnetscheidung, Sichtung oder Druckluft haben selbst nur einen sehr geringen Einfluss auf die Qualität des Gesamtprozesses. Erfahrungen aus der Recyclingindustrie zeigen, dass dies weniger als 5 Prozent sind. Fehlwürfe liegen in unseren Untersuchungen bei 3 Prozent.

Die von uns evaluierten und in Tabelle 4-3 dargestellten Kriterien sind vor allem ökonomischer (Aufwand, Durchsatz) als auch messtechnischer Art (Eindringtiefe, Genauigkeit, Detektionslimits). Generell gilt für die evaluierten Methoden für die Metallanalytik, dass teure, stationäre Geräte, die entweder offline (WDXRF) oder inline (LIBS, XRT) arbeiten, eine höhere Genauigkeit und geringere Detektionslimits aufweisen. Das heißt, diese können zuverlässig mehr Elemente in kleineren Spuren nachweisen. Allerdings können diese Fähigkeiten nur dann vollends genutzt werden, wenn vorher eine aufwendige Probenkalibrierung bzw. Probenvorbereitung stattfindet. So zeigt die Quantifizierung von Stoffströmen mit LIBS große Schwächen, wenn ein inhomogener Mischschrottstrom analysiert werden soll. Diese Methode benötigt eine umfangreiche Matrixkorrektur, die bei solchen Mischschrotten mit bis zu 20 verschiedenen chemischen Elementen sehr aufwändig, zeit- und kostenintensiv ist. Es gibt zwar Ansätze für die kalibrierungsfreie WDXRF- und LIBS-Analyse von Feststoffen, die auf physikalischen Gesetzen und Berechnungen

beruhen. Diese sind allerdings (noch) nicht für solche komplexen Stoffströme aus Mischlegierungsschrotten verfügbar. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die benötigte Messzeit für eine sichere Detektion bzw. zumindest eine Unterscheidung der Einzelstücke. Die Messzeit ist direkt mit dem Durchsatz verknüpft, der für die Wirtschaftlichkeit eines Analyse- und Sortierverfahrens eminent wichtig ist. Die schnelleren Methoden der In-line-Analysemethoden wie LIBS oder HSI erlauben höhere Durchsätze und sind weniger anfällig für inhomogene Proben. Allerdings haben diese den Nachteil der niedrigeren Genauigkeiten und damit eine erhöhte Gefahr für Fehlidentifizierung/-sortierung. Insbesondere die HSI ist im sichtbaren und nahen Infrarotbereich nicht für Metalle zur Elementquantifizierung geeignet, sondern sollte eher zur Phasenunterscheidung eingesetzt werden.

**Tabelle 4-3: Bewertung der einzelnen Analysemethoden hinsichtlich mehrerer qualitativer und quantitativer Kriterien**

	pXRF	WDXRF	XRT/CT	LIBS	NAA	HSI
Detektionslimits	0,2 wt%	0,05 wt%	niedriger wt%-Bereich	0,02%	ppm-Bereich	5 wt%
Eindringtiefe	20 µm	50 µm	durchstrahlend	100 µm pro Schuss	durchstrahlend	1 µm bis 10 mm
Genauigkeit	hoch	hoch	gering/mittel	hoch	hoch	gering (für Metalle)
Durchsatz	gering (1 m <sup>2</sup> /h)	offline, gering (0,1 m <sup>2</sup> /h)	hoch, (gering im CT-Modus)	mittel (70 m <sup>2</sup> /h)	Offline, gering	hoch (700 m <sup>2</sup> /h)
Aufwand/Kosten	gering	hoch, aufwendige Probenpräparation	mittel, hohe Anfangskosten	mittel (hoher Kalibrieraufwand)	mittel, hohe Anfangskosten	gering

Ein weiterer Punkt in der Betrachtung ist die Eindringtiefe: Während die XRF-Methoden, HSI und LIBS nur die Oberfläche einer Probe analysieren und somit eventuell eine nicht-repräsentative Stichprobe erfassen, sind NAA und XRT durchstrahlende Methoden. Diese können die Zusammensetzung des Volumenstroms gemittelt aus allen drei Dimensionen detektieren. Im Falle der langsamen CT-Variante des XRT können auch dreidimensionale Verteilungen von Einzelstücken erstellt werden, was allerdings für die Praxis des Recyclings weniger interessant ist, als für die Forschung bzw. der Qualitätskontrolle des Mikrogefüges von neu hergestellten Metalllegierungen. Mit Hilfe der (PG)NAA erhält man eine dreidimensional gemittelte Chemie von inhomogenen Proben. Die Messanlage bietet Vorteile im Vergleich zu bestehenden Verfahren, insbesondere wenn eine schnelle und repräsentative Analytik großvolumiger Proben benötigt wird. Dafür ist bei dieser Technik die In-line-Fähigkeit (noch) nicht gegeben und die Auswertung der Messungen recht komplex, sodass sie nicht standardisiert ist. Zudem können insbesondere bei der Analyse von Stählen größere Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Legierungszuschläge auftreten, die durch den Messaufbau bedingt sind.

Eine wichtige Rolle spielen auch die Kosten für eine Analysenmethode, sowohl für die Anschaffung des Geräts als auch für den Unterhalt und den entsprechend benötigten Personalaufwand. Die pXRF schneidet in diesem Fall sehr gut ab, da das Gerät inklusive geeigneter Kalibrierungen zu recht günstigen Preisen zu haben ist und die Analyse selbst kaum Probenvorbereitung verlangt. Der Einsatz von WDXRF und LIBS-Geräte ist mit höheren Anschaffungskosten sowie (im Fall der WDXRF) mit einem deutlich höheren Personalaufwand für die Probenvorbereitung und

Datenauswertung verbunden. Am oberen Ende der Kostenskala stehen die XRT- und PGNAAGeräte, wobei PGNAAGeräte für den Recyclingbereich noch nicht auf dem Markt routinemäßig erhältlich sind. Einfache XRT-Geräte sind mit WDXRF- und LIBS-Analysatoren von den Anschaffungskosten her vergleichbar, allerdings benötigen Mischschrotte mit stark variablen Zusammensetzungen höherentwickelte Modelle, die z. B. mit zwei Detektionsenergien arbeiten (dual-energy XRT).

Unsere Untersuchungen machen deutlich, dass es derzeit für komplexe Post-Consumer-Mischschrotte keine allumfassende Analyse- bzw. Sortiermethode gibt, die einfach und schnell, aber auch mit hoher Genauigkeit misst, zugleich preisgünstig ist und keine Probleme mit der Vielfalt der Schrottströme hat. Der Markt ist hier segmentiert und es gibt maßgeschneiderte Einzellösungen, wobei vor und bei deren Nutzung sehr genau darauf geachtet werden muss, wie aussagekräftig die jeweiligen Resultate sind. Daher liegt, unserer Meinung nach, eine Notwendigkeit in der Kombination von Analyse- bzw. Sortiermethoden (z. B. LIBS für die Leichtelementbestandteile von Al- und Stahlschrotten, gekoppelt mit XRF für die Hauptlegierungselemente), wenn man Fortschritte bei der Qualität des Recyclings erzielen will. Bildgebende Techniken, wie die HSI, können dabei eine Voridentifizierung ermöglichen, die anschließend durch eine element-spezifische Detektion, z. B. XRF, verfeinert wird.

**Tabelle 4-4: Faktoren (Maß für die Sortiereffizienz) für die Erkennung eines Elements in einer Legierungsart (Stahl, Aluminium, Kupfer)**

	Probe	Methode	Fe	Cu	Sn	Cd	Sn
Stahl	Referenzlegierungen	Faktor LIBS		0,65	< NWG	< NWG	
	Referenzlegierungen	Faktor pXRF	1,00	1,96	< NWG	< NWG	
	Referenzlegierungen	Faktor WDXRF	0,99	0,72	< NWG	< NWG	
	Schrotte LIBS	Faktor pXRF		2,70	< NWG	< NWG	
	Schrotte NAA	Faktor pXRF	0,98	1,27	0,19	< NWG	
			Al	Fe	Si	Cd	Sn
Al	Schrotte LIBS	Faktor pXRF unangeschliffen	0,87	9,52	14,14		
	Schrotte	<i>Faktor pXRF gemittelt (NAA+sparkOES)</i>	0,85	1,47	6,39		
	Schrotte	<i>Faktor LIBS gemittelt</i>	1,00	1,69	1,90		
	Schrotte	<i>Faktor WDXRF</i>	0,91	1,14			
			Cu	Zn	Pb	Ni	Sn
Cu	Referenzlegierungen	Faktor pXRF gemittelt	1,00	1,00	0,89	0,98	1,22
	Referenzlegierungen	Faktor WDXRF gemittelt	1,00	1,01	0,89	1,01	1,30

Sie beziehen sich immer als Verhältnis von Messwerten einer Methode auf eine andere.

Wichtig ist, festzuhalten, dass sich die Auswahl der Analyse- bzw. Sortiermethode nach den zu bestimmenden Legierungselementen bzw. Störstoffen und der Legierungsart richtet. Es gibt nicht **DIE METHODE** für alle Elemente und jede Legierungsart. Und es gibt nicht **DIE SORTIEREFFIZIENZ** für alle Legierungen und die betrachteten Methoden. Der konkrete Anwendungsfall und das Ziel müssen jeweils bekannt sein. Entsprechend werden die Methoden definiert und die Sortiereffizienzen vorhergesagt. Entscheidungshilfen geben die Vielzahl an Untersuchungen, die in AP 3 durchgeführt und im Bericht ausführlich besprochen werden.

Zwei Interpretationsmöglichkeiten der Versuchsergebnisse aus AP3 sollen an dieser Stelle für die allgemeine Verständlichkeit und zur Erklärung für den Umgang mit den ermittelten Resultaten angeführt werden. Das erste Beispiel orientiert sich an der Sortiereffizienz hinsichtlich der Elementerkennung (Legierungselemente bzw. Störstoffe). In der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Faktoren für die Erkennung eines Elements in einer Legierungsart (Stahl, Aluminium, Kupfer) aufgeführt. Sie beziehen sich immer auf das Verhältnis der Messwerte einer Methode auf eine andere.

Erklärung des Beispiels Al-Schrotten und Si-Gehalt: Wenn man die Methode pXRF mit der Referenzmethode (Funkenspektrometrie) vergleicht, ergibt sich ein 14-mal überschätzter Wert (!) für eine unangeschliffene Schrotprobe. Für eine angeschliffene Probe wurden dagegen "nur" 6,4-mal mehr Silicium erkannt. Im Vergleich dazu ist die Methode LIBS deutlich besser, da sie mit unangeschliffenen Proben gleich auf einen Faktor 1,9 kommt, also das Ergebnis nur um 90 Prozent überschätzt. Damit ist sie in dem konkreten Fall ca. 3,5-mal genauer am wahren Messwert. Mit der Verwendung von LIBS statt pXRF kann man den Si-Gehalt in Al-Schrotten also 3,5-mal besser erkennen. Das heißt, dass das Downcycling, welches auf einer falschen Konzentrationsbestimmung beruht, da, wie die Untersuchungen zeigen, die Methode für diesen Anwendungsfall ungeeignet ist, mit LIBS als Analysemethode auf 1/3,5, d. h. um ca. 72 Prozent gesenkt werden kann. Kombiniert man dieses Ergebnis mit den Fehlwürfen bei der Trennung (max. 5 Prozent), dann kann das Downcycling für Al-Schrotte insgesamt um 71 Prozent vermindert bzw. das funktionserhaltende Recycling entsprechend erhöht werden. Das gilt für den Fall, dass Silicium der Störstoff ist und Legierungen mit einem zu hohen Anteil an Si mit der dafür geeigneten Methode gezielt abgetrennt werden können.

Das zweite Beispiel beschreibt die Sortiereffizienz hinsichtlich eines vorgegebenen Grenzwertes eines bestimmten Elements, um die Trennung von störrstoffreichen und störrstoffarmen Fraktionen zu beschreiben.

In der Tabelle 4-5 sind dazu exemplarisch Berechnungen bzw. Sortiereffizienzen zu den Masse- und Konzentrationsänderungen ausgewählter Störstoffe bzw. Legierungsbestandteile in Al- und Stahllegierungen in Abhängigkeit der verwendeten Methode und vorgegebenen Grenzwertes aufgeführt. Negative Konzentrationsänderungen zeigen dabei eine relative Reduzierung bzw. Abreicherung von Störstoffen gegenüber der Ausgangszusammensetzung. Dementsprechend weist eine positive Änderung auf eine relative Anreicherung der Störstoffe in einer Fraktion hin. Das heißt, man kann die Störstoffe entsprechend des vorgegebenen Grenzwertes mittels der unterschiedlichen Methoden in unterschiedlichen Fraktionen an- oder abreichern. Das wiederum ist ebenfalls ein wichtiger Schritt zum funktionserhaltenden Recycling bzw. zum Minimieren des Downcyclings.

Es wurden Grenzwerte ausgewählt, die im Recycling von Legierungen tatsächlich eine Rolle spielen und zu den häufig vorhandenen Proben und Störstoffen (Mg, Fe in Aluminiumlegierungen) bzw. aus pyrometallurgischen Betrachtungen (Cu in Stahl) zählen. Je nachdem, wie der Grenzwert und die Sortierung (Annäherung an den Grenzwert von kleineren oder größeren Ge-

halten) gewählt werden, ergeben sich unterschiedliche Gehalte und Massen der daraus resultierenden Fraktionen. Darüberhinausgehende Limitierungen ergeben sich aus dem im Anschluss an die Charakterisierung verwendeten Trennverfahren z.B. mittels Druckluft (5 Prozent). Die methodischen Abweichungen wurden berücksichtigt.

**Tabelle 4-5: Exemplarische Berechnungen bzw. Sortiereffizienzen zu den Masse- und Konzentrationsänderungen ausgewählter Elementen in Al- und Stahllegierungen in Abhängigkeit der verwendeten Methode und vorgegebenen Grenzwertes**

	Methode	Fe < 1 Gew%		Fe > 1 Gew%	
		Fe %	Masse %	Fe %	Masse %
Al-Legierungen	LIBS	-29,67	15,06	167,19	84,94
	pXRF	-28,93	13,97	178,11	86,03
	WDXRF	-28,43	13,26	185,91	86,74
		Mg < 2,5 Gew%		Mg > 2,5 Gew%	
		Mg %	Masse %	Mg %	Masse %
Al-Legierungen	LIBS	-31,36	10,36	270,86	89,64
	pXRF	-1,72	0,32	518,84	99,68
	WDXRF	-12,20	3,37	348,73	96,63
		Cu < 0,5 Gew%		Cu > 0,5 Gew%	
		Cu %	Masse %	Cu %	Masse %
Stahl	LIBS	-95,81	64,5	52,73	35,5
	pXRF	-94,09	32,64	194,2	67,36
	WDXRF	-96,09	68,49	44,22	31,51

Negative Konzentrationsänderungen zeigen eine relative Reduzierung bzw. Abreicherung von Störstoffen gegenüber der Ausgangszusammensetzung an. Dementsprechend weist eine positive Änderung auf eine relative Anreicherung der Störstoffe in einer Fraktion hin. Die Massen beziehen sich auf die abgetrennten Fraktionen. Beispielhaft wurden folgende Sortierkriterien (Grenzwerte) angewendet: Mg 2,5 Gew%, Fe 1 Gew% und Cu 0,5 Gew%.

Es ergibt sich bei diesem konkreten Beispiel folgendes Ergebnis: Bei einem gewählten, oberen Grenzwert von 1 Gew% Fe in Al-Legierungen wird durch die Nutzung von LIBS Fe zu ca. 30% reduziert – bei einer Massereduzierung von ca. 15 %. Hierbei ist die Wahl der Messmethode in diesem Fall irrelevant, da alle untersuchten Methoden ähnliche berechnete Sortierergebnisse aufweisen. Für die Annäherung an den Grenzwert „von oben“, d.h. von höheren Werten, ergibt sich ein ähnliches Bild mit nur geringen Unterschieden zwischen den Methoden.

Andererseits unterscheiden sich für Mg in Al-Legierungen bei einem gewählten, maximalen Grenzwert von 2,5% die Methoden deutlich. Für LIBS, die ohnehin die niedrigsten analytischen Abweichungen aufweist (im Vergleich zum Funkenspektrometer), liegen die Sortierergebnisse bei einer Reduzierung um ca. 31% bei einer Masse von 10% des Aufgabegutes, wohingegen sich die Konzentrationen und Masseabscheidungen für pXRF kaum und für WDXRF wenig ändern.

Dementsprechend ergeben sich für die Masseabscheidungen nur geringe Werte, bei hohen Konzentrationsänderungen, da nur einzelne Stücke abgetrennt werden.

Für Kupfer in Stählen ist die Anreicherung für die untersuchten Methoden ähnlich, jedoch unterscheiden sich die resultierenden Massen leicht, wobei LIBS und WDXRF ähnliche Werte aufweisen und für diesen Anwendungsfall nicht geeignet sind. Hier, wie in vielen anderen Fällen ist pXRF die Methode der Wahl. Für die Annäherung „von oben“ ergeben sich kaum Massereduzierungen in den Fraktionen, lediglich LIBS zeigt eine Änderung von ca. 90% der Ausgangsmasse mit 270% höheren Mg-Gehalten.

Zusammenfassend kann konstatiert werden: Um das Downcycling deutlich zu vermindern und möglichst qualitäts- bzw. funktionserhaltend zu recyceln, ist es erforderlich die Legierungselemente exakt zu bestimmen und entsprechend der Ziellegierung in entsprechende scharfe (enge Konzentrationsbereiche) Fraktionen zu überführen. Dabei weist in den meisten Fällen die Methode pXRF die besten Ergebnisse auf. Im Fall von Aluminiumlegierungen werden die Störstoffe durch LIBS sehr gut erkannt. Die Verminderung des Downcyclings kann in der Größenordnung von **mindestens 70 Prozent** erwartet werden, wenn beispielsweise pXRF in der Recyclingindustrie breite Anwendung findet. Eine verbesserte Vorsortierung reduziert den Messaufwand und damit die erzeugte Datenmenge im Folgeschritt und trägt zur weiteren Verbesserung des qualitativen Recyclings bei.

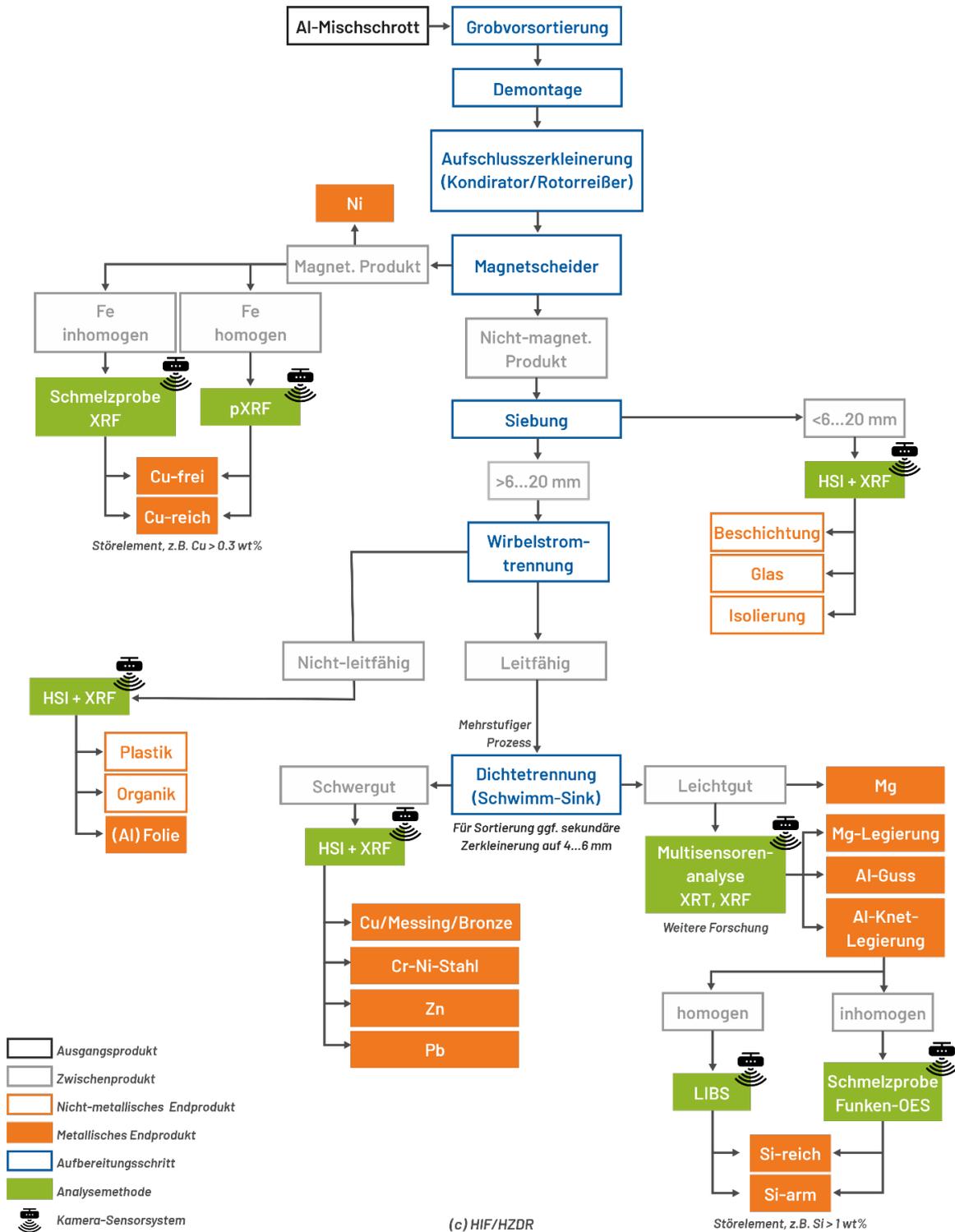
### **Idealtypische Prozesskette**

Aufbauend auf den Versuchen und Diskussionen mit Experten zur Analyse und Sortierung von Metallschrotten ergibt sich eine **idealtypische Prozesskette** für die stufenweise Separation von Mischschrotten. Ausgangspunkt ist ein Aluminium-Post-Consumer-Mischschrott (z.B. E-Waste), der zwar aluminiumreich ist, aber auch nennenswerte Mengen u. a. an Kupfer, Eisen, Zink und Silicium enthält.

Am Anfang der Prozesskette steht dann eine manuelle (visuelle) Grobvorsortierung, bei dem das Expertenwissen von Fachleuten auf den Wertstoffhöfen oder Annahmestellen entscheidend ist. Häufig kommt hier bereits ein Handheld-XRF zum Einsatz. Nach anschließender Zerkleinerung der vorsortierten Fraktionen in einem Zerkleinerungsaggregat (z.B. Schredder) werden in einem ersten Schritt Kunststoffe und andere organische Bestandteile wie Holz über einen Windsichter abgetrennt. Über geeignete analytische Methoden (z. B. HSI und XRF) werden die Kunststoffe dann in möglichst sortenreine Fraktionen getrennt, um sie einer Wiederverwendung, meist in Granulatform, zuzuführen. Der verbleibende Teil geht in den nächsten Prozessschritt, in unserem Beispiel ist das eine Dichtentrennung. In diesem Schritt werden Leicht- und Schwermetallfraktionen voneinander separiert. Über Magnetscheider erfolgt dann die Trennung in Eisen (magnetische) – und nichtmagnetische Metallfraktionen. Die Fe-Fraktion mit den entsprechenden Störstoffanteilen wird mittels XRF in störstoffarme (z.B. Cu-freie) und störstoffreiche (z.B. Cu-haltige) Fraktionen separiert. Die nichtmagnetische Fraktion wird einer Siebklassierung und Wirbelstromscheidung unterzogen, um in einem nächsten Schritt Edelstahl-Buntmetalle und Leichtmetalle voneinander zu trennen. Genau hier setzen aktuelle Forschungen an. Denn die Sortierung in Fraktionen wie Edelstahl- oder Al-Guss-Legierungen kann **nicht** mehr nur mit **einer** analytischen Methode wie LIBS oder XRT erfolgen. Die gewünschte scharfe Trennung in beispielsweise Si-reiche und – arme Fraktionen erfordert an dieser Stelle Multisensorsysteme, also eine Kombination verschiedener Methoden. Welche Kombinationen uns hier, nach Auswertung aller Ergebnisse, sinnvoll erscheint, kann dem ausführlichen Bericht entnommen werden. Eine weitere Untersetzung war nicht Inhalt des Projektes. Ein Blick auf ein im Abschlussbericht vorhandenes Beispiel für Al-Mischschrotte (siehe Abbildung 4-3) macht jedoch deutlich, an wie vielen Stellen Sensor-/Kamerasysteme zukünftig zum Einsatz kommen müssen, um das Ziel, das

Downcycling drastisch zu vermindern und funktionserhaltend zu recyceln, tatsächlich zu erreichen.

Abbildung 4-3: Beispiel einer idealtypischen Prozesskette für einen Al-Mischschrott.



Quelle: HIF HZDR, adaptiert von H. Martens et al; Recyclingtechnik, Springer, 2016.

Als letzter Schritt folgt die Weiterverarbeitung der entsprechend getrennten Fraktionen. Dies kann beispielsweise eine pyro- oder hydrometallurgische aber auch chemische Aufbereitung sein.

Insbesondere bei den analytischen Methoden (Multisensoranalysen) und der Kopplungen zu den entsprechenden (Vor-)Sortier- bzw. Trennschritten besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowohl bei der Sensorentwicklung (Messung in Echtzeit) als auch der Integration und Schaffung voll verzahnter Vorsortier-Sensor-Trenn-Systeme.

#### **4.4 AP 4 Auswertung**

In AP 4 werden die Ergebnisse der Sortier- bzw. Analyseversuche aus AP 3 und den daraus abgeleiteten verbesserten Sortiereffizienzen auf das Mengenmodell des Jahres 2030 in AP 2 übertragen und so die Einspareffekte verdeutlicht. Dabei geht es um den Teil des Gesamtaufkommens, der kein gut definierter und dadurch bereits in der Vorsortierung leicht abtrennbarer Produktionsabfall ist, sondern trotz Vorsortierung noch relativ stark vermischt in die weitere Aufbereitung geht (u.a. WEEE). Das sind z.B. Mischungen aus Aluminium-Knetlegierungen mit einem sehr hohen Aluminium-Anteil von über 99 Prozent, Aluminium-Guss-Schrott mit hohem Siliziumanteilen und Schrotten, die einen sehr hohen Titan- aber nur einen geringen Aluminiumanteil von unter 10 Prozent enthalten.

Die Sortier- und Analyseversuche in AP 3 starten mit vorsortierten Schrotten und die daraus ermittelte Sortiereffizienz bezieht sich immer auf diese Ausgangsqualität. Also zum Bsp. auf eine Sortierqualität wie Buntmetall, bei der Kupfer-Legierungen mit Messing und einzelnen Aluminiumschrottteilen vermischt sind, oder VA-Stahl, bei dem jedes Schrottteil der Probe aus stark chromhaltigem Schrott besteht, aber reiner Chromstahl noch mit Chrom-Nickel-Stahl und anderen Edelstählen vermischt sind.

Für die Berechnungen in AP 4 wurden zunächst jeweils die Ergebnisse des kombinierten und gekoppelten Einsatzes der Vorsortierung durch Magnetscheider und Wirbelstromscheider und einer händischen Formsartierung in Kombination mit den Analyse- bzw. Sortiertechnologie, LIBS, pXRF etc. verwendet. Dabei wurden für die meisten Legierungselemente eine hohe Sortiereffizienzverbesserung ermittelt.

##### **Sortiereffizienzen und Umweltindikatoren**

Mittels Anwendung der der Vorsortierung nachgeschalteten Analysen- bzw. Sortiermethoden wie pXRF und LIBS erreicht man eine Sortiereffizienzverbesserung von beispielsweise Si- und Ti-reichen Aluminiumlegierungen von durchschnittlich 26,3 Prozent (nur pXRF) bzw. 89,0 Prozent (pXRF + LIBS). Eine prozentual besonders hohe Sortiereffizienzsteigerung erhält man mit pXRF beim Legierungselement Titan. Die Verluste im Herstellungsprozess neuer Legierungen aus Mischschrotten gehen durch die verbesserte Sortierung der Aluminiumschrottfractionen um ca. 14 Prozent zurück.

Diese prozentuale Veränderung spiegelt sich entsprechend in den Indikatoren der Umweltbewertung wider. Die Summe des KRA aller Elemente reduziert sich bei der Verwendung von pXRF und einem Vermischungsverhältnis von 40 Prozent von 5,18 Mio. t durch eine verbesserte Sortiereffizienz auf 3,76 Mio. t. Die Summe des KEA sinkt von 80,33 Mio. GJ auf 59,20 Mio. GJ und der Carbon Footprint von 8,15 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent auf 6,02 Mio. t (Tabelle 6). Die drei Umweltindikatoren verbessern sich also durch die verbesserte Sortier- bzw. Analysetechnik mit pXRF gegenüber dem Status Quo für jedes Mengenmodell um knapp ein Viertel: KRA: -27,6%, KEA -26,3% und der Carbon Footprint -26,1%.

**Tabelle 4-6: Überblick der Sortierverbesserung von Aluminium und davon abgeleitete Einsparung des Carbon Footprint für Deutschland 2030**

Schrottkategorie	Status Quo (AP2)	Sortierverbesserung pXRF	Sortierverbesserung pXRF + LIBS	Veränderung Sortierverbesserung pXRF	Veränderung Sortierverbesserung pXRF + LIBS
AL 30% vermischt 2030 min Nachverdünnung in t	224.644	165.489	24.743	- 59.155	-199.901
Verluste in t	390	335	335	-55	-55
Carbon Footprint Nachverdünnung + Verluste (in 1000 t CO <sub>2</sub> -Äqu.)	5.634	4.163	640	-1.471	-4.994
AL 40% vermischt 2030 min Nachverdünnung in t	299.525	220.652	32.991	-78.873	-266.534
Verluste in t	520	447	447	-73	-73
Carbon Footprint Nachverdünnung + Verluste (in 1000 t CO <sub>2</sub> -Äqu.)	7.513	5.550	853	-1.963	-6.660
AL 30% vermischt 2030 max Nachverdünnung in t	243.695	179.524	26.841	-64.171	-216.584
Verluste in t	423	364	364	-59	-59
Carbon Footprint Nachverdünnung + Verluste (in 1000 t CO <sub>2</sub> -Äqu.)	6.112	4.514	694	-1.598	-5.418
AL 30% vermischt 2030 max Nachverdünnung in t	324.927	239.365	35.789	-85.562	-289.138
Verluste in t	564	485	485	-79	-79
Carbon Footprint Nachverdünnung + Verluste (in 1000 t CO <sub>2</sub> -Äqu.)	8.150	6.021	925	-2.129	-7.225

Durch den Einsatz von pXRF im Vergleich zum Status Quo kann also nur für Deutschland je nach Vermischungsgrad und Szenario im Jahr 2030, basierend auf den hier gewählten Annahmen, zwischen rund 59.200 t und 85.600 t an Material und zwischen 1,5 Mio. und 2,2 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden (Tabelle 4-6).

### Reduzierung des Downcyclings

An dieser Stelle wird exemplarisch ein Ergebnis für Aluminiumlegierungen mit den Begleitelementen Eisen und Silizium und den Methoden LIBS und pXRF erläutert.

Die Messwerte in AP 3 machen deutlich, wie, je nach angewandeter Methode, die tatsächlichen Gehalte überschätzt oder unterschätzt werden können. So führt LIBS beispielsweise zur sehr guten Erkennung von Aluminium, aber zur Überschätzung der Silizium-Konzentration in Aluminiumlegierungen um den Faktor 1,9 (90 Prozent). Die Methode pXRF liegt in diesem Fall noch deutlich darüber, ist aber für viele weitere (schwerere) Legierungselemente die Methode der Wahl. Der für diesen Fall ermittelte Nachverdünnungsaufwand für die wesentlichen Legierungselemente ändert sich, insbesondere bei der **Kombination der Methoden pXRF und LIBS**, sehr deutlich, nämlich um über – 90 Prozent. Der Einspareffekt mit pXRF alleine liegt bei 59,2 kt bis 86,6 kt Primärrohstoffen und in Kombination mit LIBS bei 200 kt bis 289 kt in 2030.

Mit dem deutlich niedrigeren Nachverdünnungsaufwand bei der Verwendung von pXRF in Kombination mit LIBS sinken folglich auch die Werte der Umweltbewertungsindikatoren, wenn man unterstellt, dass im Jahr 2030 eine flächendeckende Anwendung dieser Methoden in der Recyclingbranche erfolgt. So werden nicht nur 1,5 bis 2,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden, sondern 5,0 bis 7,2 Mio. t bei Verwendung beider Methoden in Kombination miteinander.

## 4.5 AP5 Handlungsempfehlungen

Basierend auf den Ergebnissen von AP1 bis 4 werden Vorschläge unterbreitet, wie sich die von uns entwickelten Konzepte in der Metallrecyclingwirtschaft, zur Hebung der ermittelten Potentiale und zur flächendeckenden Verbreitung der legierungsspezifischen Sortierung, verankern lassen. Das prioritäre Ziel dieser Handlungsempfehlungen ist die Etablierung eines möglichst hochwertigen funktionserhaltenden Recyclings metallischer Legierungen und ihrer Begleitelemente und Vermeidung von Downcycling.

### Produktdesign und Produktpass

Eine der Hauptforderung ist, schon beim Produktdesign auf Recyclingfähigkeit zu achten. Das schließt beispielsweise die **einfache Demontage** ein (siehe Abbildung 4-4), so dass Produkte nach ihrer Nutzungsdauer (EoL) gut in ihre Einzelbestandteile zerlegbar sind. Dazu gehört aber auch, dass Produkte aus möglichst wenigen Legierungsarten bzw. wenig mit Störstoffen belasteten Metallen bestehen. Das vereinfacht die sortenreine Trennung und vermindert die Verluste an Begleitelementen im pyrometallurgischen Prozess. Ein **Produktpass** mit den nötigen Informationen für den Recycler vereinfacht das funktionserhaltende Recycling darüber hinaus.

### Transparenz- und Berichtspflicht

Es ist erforderlich, eine zuverlässige und umfassende Datengrundlage auf Basis fortlaufender Erhebungen zu legierungsspezifischen Stoffströmen und Rohstoffverlusten zu schaffen. So sind Schwachstellen und Hotspots zu identifizieren sowie wichtige Angaben, wie Menge, Zusammensetzung, Nachfrage, Grenzwerte, Quoten und Zielwerte zu ermitteln. Für fundierte Entscheidungen relevanter Akteur\*innen der Wissenschaft, Politik und Recyclingwirtschaft sind Stoffströme aus Demontage, Sortierung und Recycling standardisiert und fortlaufend zu ermitteln, zu dokumentieren und zu berichten.

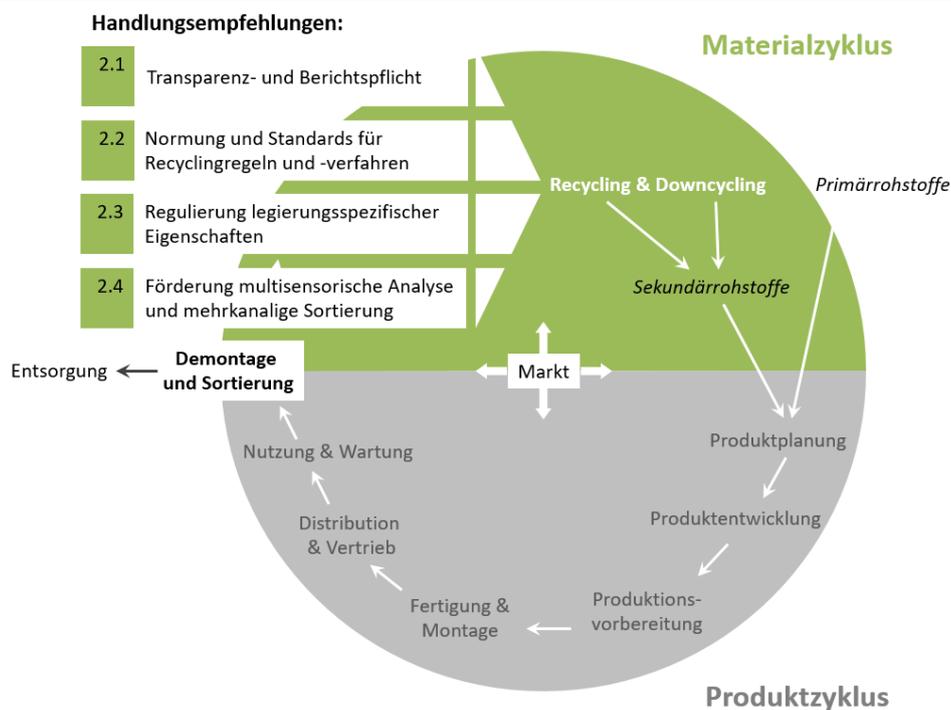
### Definition von Downcycling, Zweck und Qualität

Die heterogenen und unklaren Definitionen von Recycling und Downcycling stehen der Motivation, funktionserhaltend zu recyceln, entgegen. Geeignete Vorschläge zur Definition von Downcycling werden im Bericht unterbreitet.

Wichtig ist ebenfalls, die Begriffe des „Zwecks“ und des „ursprünglichen Zwecks“, z. B. in der AbfallRRL, dem KrWG, der AltfahrzeugRL, klar zu definieren. Es ist deutlich zu machen, welches Einsatzspektrum Rezyklate zukünftig haben und in welchen Produkten sie sich zu welchem Anteil wiederfinden sollen. Aus diesem Grund ist der Zweck des Recyclings sowie eine verpflichtende Substitutionsquote, die sich dem technologischen Fortschritt anpasst, für neue Produkte zu definieren.

Es bleibt festzustellen, dass es bisher kein universelles Maß für die Materialqualität gibt, auf das sich eine Definition von Downcycling beziehen kann. Das bedeutet, dass Downcycling zukünftig quantifizierbar zu machen ist, denn nur so können Downcycling-Effekte in ihrer Höhe identifiziert und bei Technologieentwicklungen zur Vermeidung von Downcycling berücksichtigen werden. Downcycling ist im Rahmen der Recyclingziele so als Phänomen zu verankern, das es zukünftig über Anreizsysteme möglichst vermieden wird.

**Abbildung 4-4: Schematische Prozesskette und politische Handlungsfelder**



Quelle: Eigene Darstellung, TU Dortmund

### Substitutionsquote

Das Ziel, hohe Massen beim Recycling umzusetzen, lässt die Zielsetzung einer möglichst feinen Trenn- und Sortiertiefe und folglich die Vermeidung von Downcycling-Effekten in den Hintergrund rücken. Die Berechnung von Recyclingquoten ist in diesem Zusammenhang nicht ausreichend. Sie bilden zwar die Sammelrate an recyclingfähigem Material ab, haben jedoch keine Aussagekraft wie viel recyceltes Material dann tatsächlich wieder in das Wirtschaftssystem zurückfließt. Zielführender ist eine Substitutionsquote, die das Verhältnis von eingesetzten Recyclingrohstoffen bezogen auf den insgesamt genutzten Materialaufwand (Primärrohstoffe und Recyclingrohstoffe) angibt. Die Substitutionsquote sollte insbesondere die Material- bzw. Rohstoffmenge ermitteln, die sich als Recyclingrohstoff in neuen hochwertigen Produkten wiederfindet. Das würde automatisch das Downcycling vermindern.

### **EU-weite Vereinheitlichung von Recyclingregeln, - Standards und -Verfahren**

Die Vereinheitlichung von Recyclingregeln bei gleichzeitiger EU-weiter Kooperation ist wichtig, um die derzeitigen Rohstoffverluste u.a. auch durch Downcycling zu minimieren. Eine EU-weite Vereinheitlichung von Recyclingregeln und -Verfahren unterstützt die Sicherstellung funktionierender Recycling-Binnenmärkte und eines funktionserhaltenden Recyclings. Aktuell bestehen innerhalb der EU erhebliche Unterschiede in der Prozessqualität des Recyclings hinsichtlich der Rückgewinnung und Qualität des Recyclates, der Wiederverwendung, Schadstoffentfrachtung, Prozessemissionen, Sicherheits- und Umweltstandards sowie dem Vollzug der Abfallgesetzgebung. Dadurch kommt es zu Abflüssen von Abfällen in Länder mit nur freiwilliger Anwendung und weniger guten Recyclingprozessen. Wichtige Wertstoffe gehen dadurch nicht nur dem heimischen Markt, sondern prinzipiell verloren.

Auf Basis eines einheitlichen Verständnisses des Recyclingprozesses sowie der Recyclingziele, wie zum Beispiel Quoten, wird Transparenz erreicht. Außerdem werden Verluste aller Art u.a. auch der Qualität minimiert, in dem eine übergreifende und vernetzte Optimierung des Recyclings angeregt wird. Eine Standardisierung darf dabei einem effizienten, auf spezifische Anforderungen abgestimmten, Recycling nicht im Wege stehen. Ziel müssen verpflichtende Standards und technische Spezifikationen sein, die den Stand der Recyclingtechnik der gesamten Wertschöpfungskette berücksichtigen und weiterentwickeln und dabei auch Umwelt, Gesundheit und Verfahrenseffizienz betrachten.

Auch eine Spezialisierung einzelner Betriebe auf bestimmte Hauptmetalle kann zur Vermeidung von Downcycling-Effekten führen, in dem die einzelnen Metalle, Legierungen oder Elemente zu dafür spezialisierten Recyclinghöfen befördert und dort aufbereitet werden. Der Herausforderung kann entsprochen werden, indem strategisch günstig liegende Recyclingbetriebe hinsichtlich einer Spezialisierung gefördert werden und sich mit weniger spezialisierten Betrieben vernetzen. Solche spezialisierten Recyclinglösungen bieten im Ansatz beispielsweise Unternehmen, wie Aurubis AG, Panizzolo S.r.l., Barradas GmbH oder Recuperma GmbH.

### **Legierungsbezeichnungen EU-weit harmonisieren, Vielfalt reduzieren**

Legierungsbezeichnungen und - Nummern sind zu standardisieren, vor allem aber EU-weit zu harmonisieren, um die Nachvollziehbarkeit legierungsspezifischer Stoffströme zu steigern. Bestehende Bezeichnungsstandards gelten entweder national, auf europäischer Ebene oder weltweit. Ziele der Normierung sollte die Gewährleistung von Qualitätssicherung, Sicherheit und Umweltschutz sowie eine bessere Verständigung dazu zwischen Wirtschaft, Technik, Wissenschaft, Verwaltung sein.

Es ist zu diskutieren, ob es beispielweise mehr als 2000 unterschiedlicher Stahllegierungen bedarf. Die Vielfalt an unnötigen Legierungselementen sollte auf ein Mindestmaß reduziert werden, um Downcycling zu vermeiden.

### **Forschung und Entwicklung zur verfahrenstechnischen Optimierung**

Um ein hochwertiges Recycling zu gewährleisten, sind legierungsspezifische Stoffströme mit möglichst hoher Sortiertiefe hinsichtlich der Begleitelemente voneinander zu trennen. Dies ist mit den derzeit am Markt befindlichen Sortier- und Trennverfahren nur sehr eingeschränkt möglich. In diesem Zusammenhang wird empfohlen, binäre Einzelsortierverfahren durch mehrkanalige Mehrstufensortierung zu ersetzen. An die Wissenschaftler\*innen und Sensorentwickler\*innen wird appelliert, das Metallrecycling u.a. mit innovative multimodale In-line-Analyse- bzw. Sortiertechniken zu verbessern, um damit die Erkennung von Störstoffen in Echtzeit zu ermöglichen. Entsprechende Technologieentwicklungen sollten finanziell unterstützt werden.

## Leuchtturmprojekte

Die finanzielle Unterstützung von strategischen Leuchtturmprojekte, die das Ziel einer innovativen und „idealen Prozesskette“ der Sammlung, Demontage, Sortierung, Trennung und Aufbereitung verfolgen, stellt ein weiteres politisches Instrument dar, um Downcycling entgegenzuwirken. Solche Projekte können aufgrund ihrer Größe und Öffentlichkeitswirksamkeit die Funktion eines Richtungsweisers erfüllen. Ziel ist es, in der Öffentlichkeit ein Bewusstsein für Wertstoffe, ihr Recycling und nachhaltige Verwendung zu schaffen. Konsumententscheidungen werden damit in Richtung kreislaufgerechter Lösungen unterstützt. Hierbei spielt die Kooperation von Produktentwickler\*innen, Herstellern und Recyclern eine wichtige Rolle.

Erläuterte politische Handlungsempfehlungen verfolgen auf der einen Seite Ziele und potenzielle Chancen. Auf der anderen Seite sind mit der Umsetzung dieser Maßnahmen jedoch auch Risiken, Hemmnisse und Herausforderungen zu erwarten. Diese werden für eine Gesamteinschätzung in Tabelle 4-7 gegenübergestellt und eingeordnet.

**Tabelle 4-7: Gesamteinschätzung der politischen Handlungsempfehlungen**

Politische Handlungsempfehlungen	Chancen / Ziele	Risiken / Herausforderungen
<b>2.1 Transparenz- und Berichtspflicht</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zuverlässige Datengrundlage für politische Entscheidungen, z. B. Festlegung von Grenzwerten</li> <li>• Internationale Vernetzung durch Zusammenarbeit</li> <li>• Schaffen von Bewusstsein für die legierungsspezifische Stoffströme und Verluste durch Transparenz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Aufwand für Unternehmen der Herstellung, Entsorgung und Aufbereitung von Metalllegierungen</li> <li>• Hoher Aufwand der Standardisierung und Einführung eines geeigneten Dokumentationsverfahrens</li> <li>• Notwendigkeit des verbreiteten Einsatzes moderner Analysetechnik</li> </ul>
<b>2.2 Normung bzw. Standards für Recyclingregeln und -verfahren</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Internationale Zusammenarbeit zur Anpassung von Standards und gemeinsame Zielsetzungen</li> <li>• Einheitliches Verständnis von Recycling und Downcycling zur Begünstigung einer internationalen Kreislaufführung</li> <li>• Vergleichbarkeit von Kennzahlen, z. B. der Recyclingquoten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehlende Spezialisierung von Recyclinghöfen</li> <li>• Hoher Aufwand der Standardisierung und Harmonisierung in Regularien</li> </ul>
<b>2.3 Regelung legierungsspezifischer Eigenschaften</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Marktwirtschaftlicher Anreize, Produkte, Stoffströme und Prozessverfahren entsprechend Zielvorgaben zu optimieren, z. B. Verringerung von Legierungselementen, die nicht der Ausgangslegierung angehören</li> <li>• Geringere Importabhängigkeit durch Rezyklateinsatz</li> <li>• Wirtschaftliche und gesellschaftliche Aufmerksamkeit durch öffentliche Transparenz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Forschungsaufwand zu Substitutionsmöglichkeiten</li> <li>• Hoher Aufwand der Optimierung von Produkten bezüglich möglicher Einschränkung in der Funktionalität</li> <li>• Hoher Aufwand der Nachweisführung (siehe z. B. REACH)</li> </ul>

Politische Handlungsempfehlungen	Chancen / Ziele	Risiken / Herausforderungen
<p><b>2.4 Förderung multi-sensorischer Analyse und mehrkanaliger Sortierung</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhte Sortiereffizienz und erhöhter Sortiererfolg zur Vermeidung von Downcycling-Effekten</li> <li>• Stärkung des Forschungs- und Industriestandorts durch Einsatz und Optimierung modernster Sensor- und Trenntechniken</li> <li>• Gestärkte Aufmerksamkeit und Bewusstsein der Gesellschaft</li> <li>• Schaffung einer transparenten Datenbasis zur Steigerung von Effizienz und Lösungsfindung für Schwachstellen</li> <li>• Schaffung von marktwirtschaftlichen Anreizen für hohen Sortierfolg und hochwertiges Recycling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kostenaufwand durch Bezug finanzieller Mittel zur Förderung technischer Anlagen und geschultem Personal</li> <li>• Gefahr einer Fehlinvestition durch mangelhafter Auslastung der Technologien</li> <li>• Gefahr einer Überregulierung des Marktes</li> <li>• Herausforderung der System- und Infrastrukturanpassung</li> </ul>

## 5 Ausblick

Im Rahmen von AP1 bis AP4 konnten Handlungsempfehlungen für Politik, Wissenschaft und Wirtschaft sowohl auf nationaler, als auch auf internationaler Ebene herausgearbeitet werden, die auf einer zum überwiegenden Teil selbst erhobenen und damit belastbaren Datenbasis beruhen. Der Fokus lag dabei auf Handlungsempfehlungen, die sich insbesondere den wissenschaftlich-technischen Herausforderungen des funktionserhaltenden Recyclings von metallischen Legierungen widmen. Dabei stand die Frage im Vordergrund, wie Primärrohstoffe im Recyclingprozess als Verdünnungsmittel eingespart, Downcycling vermindert und funktionserhaltendes Recycling gewährleistet werden kann. Die wissenschaftlich-technische Weiterentwicklung innovativer legierungsspezifischer Sortier- und Trennverfahren basierend auf Kombinationen von Kamera-/Sensorsystemen und die flächendeckende Etablierung dieser modernen Methoden in der Recyclingwirtschaft ist eine der wesentlichen Säulen zur deutlichen Verbesserung der aktuellen Situation. Das recyclinggerechte Gestalten von Materialien, Produkten und Gütern ist eine zweite Säule, um ein späteres Downcycling zu vermeiden und neben den dafür notwendigen gesetzlichen Rahmenbedingungen Grundlage einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft. Hierzu bedarf es den engen Austausch zwischen Material- und Produktentwicklern, Recyclern sowie eines Bewusstseins in der Gesellschaft für Wertstoffe, ihr Recycling und ihre nachhaltige Verwendung. Konsumententscheidungen werden damit in Richtung kreislaufgerechter Lösungen unterstützt.