

TEXTE

116/2018

DelphiNE: Ermittlung von Ressourcenschonungs- potenzialen in der Nichteisenmetallindustrie durch eine Zukunftsanalyse nach der Delphi-Methode

Abschlussbericht

TEXTE 116/2018

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3713 93 306
UBA-FB 002728

DelphiNE: Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen in der Nichteisenmetallindustrie durch eine Zukunftsanalyse nach der Delphi-Methode

Abschlussbericht

von

Till Zimmermann
Ökopol Institut für Ökologie und Politik GmbH, Hamburg vormals Universität
Bremen, Bremen

Stefan Gößling-Reisemann
Universität Bremen, Bremen aforetec GbR, Bremen

Ralf Isenmann
Wilhelm Büchner Hochschule, Pfungstadt bei Darmstadt vormals Hochschule
München, München

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Aforetec GbR
Am Gropen Moordamm 75
28357 Bremen

Abschlussdatum:

Juli 2017

Redaktion:

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

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Dezember 2018

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

Kurzbeschreibung

Das Projekt DelphiNE verfolgt folgende zentrale Ziele: Initiierung einer Diskussion zur Rolle der NE-Metallindustrie in einer „Green Economy“ und Herausarbeitung möglicher Entwicklungsszenarien. Die Schwerpunkte liegen hierbei auf der Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe, der Substitution von fossilen Brennstoffen und Reduktionsmitteln, der Steigerung der Ressourceneffizienz, dem Einsatz erneuerbarer Energien zur dezentralen Stromversorgung der Unternehmen und dem Recycling von bisher ungenutzten Abfällen. Zentrales methodisches Werkzeug ist die Delphi-Befragung. Anhand eines Fragebogens, der auf Grundlage einer umfangreichen Literaturrecherche sowie einer Workshop-basierten Experteneinbindung entwickelt wurde, wurden in zwei Befragungsrunden von Eingangs 130 Innovationsmaßnahmen 71 Maßnahmen mit hohem Potenzial identifiziert, die in einem „Zukunftsworkshop“ tiefergehend diskutiert und bewertet wurden. Auf dieser Basis ergeben sich verschiedene Maßnahmenbündel, die auf eine gesteigerte Ressourcenschonung in der NE-Metallindustrie in einer Green Economy abzielen. In einem nachfolgenden „Szenarienworkshop“ wurden ergänzend Rahmenbedingungen (interne und externe Einflussfaktoren) für die Maßnahmenbündel erarbeitet, diskutiert und bewertet. Auf dieser Basis wurden zwei konsistente Rahmenszenarien abgeleitet.

Abstract

The project DelphiNE has the following central objectives: Initiation of a discussion on the role of the non-ferrous metal industry in a "green economy" and elaboration of possible development scenarios. The focus areas include the substitution of primary raw materials by secondary raw materials, the substitution of fossil fuels and reducing agents, increasing resource efficiency, the use of renewable energies for the decentralized power supply of companies and the recycling of previously unused waste. The central methodological tool is the Delphi survey. Based on a comprehensive literature review and a workshop-based expert involvement, a list of 130 potential measures for saving resources in the non-ferrous industry has been derived. In the Delphi Survey this list has been condensed within two survey rounds to 71 measures with a particularly high potential. These measures have then been further discussed and assessed in a "future workshop". Based on the results from the "future workshop" different bundles of measures for saving resources in the non-ferrous industry have been developed. In a subsequent "scenarios workshop" supplementary framework conditions (internal and external influencing factors) were developed, discussed and evaluated. On this basis, two consistent framework scenarios have been derived.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis	14
Zusammenfassung.....	15
Summary.....	24
1 Einleitung.....	33
1.1 Green Economy.....	33
1.2 Ziele und Vorgehen.....	34
2 Analyse derzeitiger Entwicklungen.....	36
2.1 Vorgehen nach Technologiekomplexen	36
2.2 Untersuchte Technologien: Prozessketten in Deutschland.....	40
2.2.1 Aluminium	41
2.2.2 Kupfer.....	46
2.2.3 Blei.....	52
2.2.4 Zink	56
2.2.5 Literaturdatenbanksuche zu den vier Fokusmetallen.....	61
2.2.6 Erweiterte Suche nach Potenzialen entlang der Prozesskette	65
2.2.6.1 Energieverbräuche der Metallherstellung: Fokusmetalle in der Übersicht	65
2.2.6.2 Energieverbrauch in der Aluminiumindustrie im Speziellen	66
2.2.6.3 Verwendung inerter Anoden in der Aluminiumgewinnung	67
2.2.6.4 CO ₂ -neutrale Aluminiumindustrie	68
2.2.6.5 Weitere Energie- und Ressourceneffizienzpotenziale	69
2.2.6.6 Best-Practice Beispiele aus der NE-Metallindustrie	69
2.2.7 Komplementäre Technologien.....	71
2.2.7.1 Datenbanksuche nach Innovationen aus dem Bereich der komplementären Technologien	71
2.2.7.2 Cross-Industry-Innovationen	73
2.2.7.3 Erweiterte Suche nach Innovationen im Bereich der komplementären Technologien/ Best-Practice Beispiele	74
2.2.8 Geplante und laufende Forschungsvorhaben.....	79
2.2.8.1 Vorhaben DeteRess	80
2.2.8.2 Fördermaßnahme r ²	80
2.3 Rahmenbedingungen.....	81

2.3.1	Rolle der NE-Metallindustrie in der deutschen Wirtschaft.....	81
2.3.2	Bedarfsentwicklungen.....	81
2.3.3	Versorgungssituation	81
2.3.3.1	Preisentwicklung	81
2.3.3.2	Versorgungskapazitäten	82
2.3.4	Kritikalität	82
2.4	Vorgelagerte Systeme.....	83
2.5	Nachgelagerte Systeme	83
2.6	Zusammenfassung	83
2.6.1	Ressourcenschonungspotenziale und Forschungstrends	83
2.6.2	Thesen	85
2.6.2.1	Untersuchte Technologien / Prozesskette (inkl. komplementäre Technologien):	85
2.6.2.2	Rahmenbedingungen	86
2.6.2.3	Vorgelagerte Systeme	86
2.6.2.4	Nachgelagerte Systeme	86
2.6.3	Akteure.....	86
3	Konzeption der Delphi-Befragung	91
3.1	Delphi-Methode.....	91
3.2	Vorgehen zur Erarbeitung des Fragebogens.....	93
3.3	Anmerkungen zum Expertenworkshop	95
3.4	Finalisierung des Thesenkatalogs	96
3.5	Überführung in Fragebogen	97
3.6	Identifizierung von Experten als Teilnehmer.....	98
4	Durchführung der Delphi-Befragung	102
4.1	Vorgehen und Methodik.....	103
4.1.1	Implementierung des Fragebogens ins Befragungstool	103
4.1.2	Durchführung eines Pre-Tests.....	104
4.1.3	Einladung und Durchführung der ersten Befragungsrunde.....	104
4.1.4	Ergebnisse und Auswertung der ersten Befragungsrunde	105
4.1.4.1	Teilnehmerstatistik	105
4.1.4.2	Unternehmensspezifische Fragen	107
4.1.4.3	Wissenschaftsspezifische Fragen	108
4.1.5	Vorgehen zur Auswertung & Entwicklung des Fragebogens zur zweiten Befragungsrunde	110

4.1.6	Fragebogenentwicklung zur zweiten Befragungsrunde.....	112
4.1.7	Einladung und Durchführung der zweiten Befragungsrunde	113
4.1.8	Ergebnisse und Auswertung der zweiten Befragungsrunde	113
4.1.8.1	Teilnehmerstatistik	113
4.1.8.2	Unternehmensspezifische Fragen	115
4.1.8.3	Wissenschaftsspezifische Fragen	117
4.1.8.4	Auswertung des fachlichen Teils	117
4.1.8.5	Beispielhafte Ergebnisse	118
4.1.9	Umgang mit den Ergebnissen der 100 Mio. Euro Frage	120
4.1.10	Zusammenfassung: Output der Delphi-Befragung	121
5	Diskussion und Bewertung von Ressourcenschonungsmaßnahmen im Zukunftsworkshop	123
5.1	Ergebnisse des Zukunftswshops.....	124
5.2	Verdichtung und Strukturierung der Ergebnisse des Zukunftswshops	125
5.2.1	Maßnahmenbündel 1A	126
5.2.2	Maßnahmenbündel 1B.....	127
5.2.3	Maßnahmenbündel 2A	127
5.2.4	Maßnahmenbündel 2B.....	128
5.2.5	Maßnahmenbündel 3.....	129
5.2.6	Maßnahmenbündel 4.....	130
6	Ermittlung von Rahmenbedingungen und Konsequenzen im Szenarienworkshop	131
6.1	Zielsetzung und Methodik	131
6.2	Bestimmung, Konkretisierung und Bewertung interner Einflussfaktoren	132
6.3	Diskussion und Auswahl externer Einflussfaktoren.....	133
6.4	Entwicklung von Zukunftsprojektionen für die internen und externen Einflussfaktoren	135
6.5	Sammlung von „wild cards“	137
6.6	Bewertung der Erwartbarkeit von Ausprägungsalternativen.....	138
6.7	Wechselwirkungsanalyse und Ableitung von konsistenten Szenarien.....	139
6.7.1	Szenario „Rückenwind“	143
6.7.2	Szenario „Gegenwind“	143
6.8	Diskussion der Maßnahmen unter den ausgewählten Szenarien	144
7	Zusammenfassende Bewertung und Ausblick.....	148
8	Quellenverzeichnis.....	150
9	Anhang.....	158

Anhang A: Inputs und Outputs von Schritten der Aluminiumherstellung.....	158
Anhang B: Abfrage der Literaturdatenbank Web-of-Knowledge	158
Anhang C1: Best-Practice Beispiele	158
Anhang C2: Forschungsvorhaben	158
Anhang D: Ergebnisse des Expertenworkshops.....	158
Anhang E: Fragebogens zur Delphi-Befragung, Runde 1	158
Anhang F: Maßnahmen nach Anwendung der Entscheidungsregeln und qualitativer Prüfung	158
Anhang G: Fragebogen zur Delphi-Befragung Runde 2	158
Anhang H: Ergebnisse der zweiten Befragungsrunde	158

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Visualisierung der Befragungsergebnisse in Form von Tachometern	17
Abbildung 2:	Technologiekomplex zur Kennzeichnung des Umfelds einer untersuchten Technologie.....	36
Abbildung 3:	Technologiekomplex-Beispiele	38
Abbildung 4:	Technologiekomplexe der vier Fokusmetalle - Struktur und zentrale Elemente.....	40
Abbildung 5:	Prozesskette der Aluminiumherstellung und -verarbeitung in Deutschland	43
Abbildung 6:	Prozesskette der Kupferherstellung und -verarbeitung in Deutschland	48
Abbildung 7:	Prozesskette der Bleiherstellung und -verarbeitung in Deutschland	53
Abbildung 8:	Prozesskette Zinkherstellung und -verarbeitung in Deutschland	58
Abbildung 9:	Suchergebnisse Web-of-Knowledge: Forschungsschwerpunkte im Zeitverlauf.....	64
Abbildung 10:	Energieverbräuche in Herstellung verschiedener Metalle	65
Abbildung 11:	Prozessenergieverbräuche in der Aluminiumverarbeitung in den USA	67
Abbildung 12:	Energieverbrauch und Emissionen der Aluminiumherstellung in Abhängigkeit vom Energieträger	69
Abbildung 13:	Abwärmequellen	73
Abbildung 14:	Material- und Energieflüsse einer Messinggießerei.....	76
Abbildung 15:	Unerschlossene Einsparpotenziale ausgewählter Effizienztechnologien.....	79
Abbildung 16:	Preisentwicklungen von Aluminium, Kupfer, Blei und Zink ab 1900..	82
Abbildung 17:	Vorgehensschema zur Delphi-Befragung	92
Abbildung 18:	Vorgehen zur Erarbeitung des Fragebogens	93
Abbildung 19:	Technologiekomplex –Zentrale Elemente und Ankerpunkte	94
Abbildung 20:	Impressionen aus dem Expertenworkshop	96
Abbildung 21:	Vorgehen beim Pyramiding	100
Abbildung 22:	Vorgehensmodell zur Delphi-Befragung.....	102
Abbildung 23:	Start-Bildschirm zur Delphi-Befragung	103
Abbildung 24:	links: Struktur des Delphi-Fragebogens; rechts: Frage zur Identifizierung der Teilnehmer	103
Abbildung 25:	Frage aus dem Fachteil; hier: Organisatorisch-konzeptionelle Entwicklungen	104

Abbildung 26:	Teilnehmerstruktur der Delphi-Befragung, erste Befragungsrunde	106
Abbildung 27:	Expertise für Bereiche der NE-Metallindustrie.....	107
Abbildung 28:	Umsatzstruktur der teilnehmenden Unternehmen, erste Befragungsrunde	107
Abbildung 29:	Mitarbeiterstruktur der teilnehmenden Unternehmen, erste Befragungsrunde	108
Abbildung 30:	Geographischer Tätigkeitsschwerpunkt der teilnehmenden Unternehmen	108
Abbildung 31:	Schwerpunkte der wissenschaftlichen Tätigkeit der Teilnehmer.....	109
Abbildung 32:	Forschungsschwerpunkte der Teilnehmer	109
Abbildung 33:	Teilnehmerstruktur der Delphi-Befragung, zweite Befragungsrunde	114
Abbildung 34:	Abfrage der Expertise nach Metallen	115
Abbildung 35:	Zuordnung nach Tätigkeitsfeldern.....	115
Abbildung 36:	Umsatzstruktur der teilnehmenden Unternehmen, zweite Befragungsrunde	116
Abbildung 37:	Mitarbeiterstruktur der teilnehmenden Unternehmen, zweite Befragungsrunde	116
Abbildung 38:	Forschungsschwerpunkte der Befragten, zweite Befragungsrunde	117
Abbildung 39:	Beispielhafte Ergebnisse der zweiten Befragungsrunde I	119
Abbildung 40:	Beispielhafte Ergebnisse der zweiten Befragungsrunde II	120
Abbildung 41:	Visualisierung der Befragungsergebnisse in Form von Tachometern	123
Abbildung 42:	Einordnung des Szenarienworkshops in das Gesamtprojekt	131
Abbildung 43:	Begriffe und Konzepte zur Erarbeitung von Szenarien.....	132
Abbildung 44:	Schritte zur Erarbeitung von Szenarien in DelphiNE (rot: Workshoparbeit).....	132
Abbildung 45:	Basis für die Vorauswahl der externen Treiber (vier Szenarienstudien des Umweltbundesamtes).....	134
Abbildung 46:	Einfluss von Treiber B (Globale Nachfrage und Konsum) auf Treiber D (Energie und Rohstoffpreise).....	140
Abbildung 47:	Wechselwirkungsmatrix alle Treiberausprägungen	141
Abbildung 48:	Konsistente Szenarien mit Treiberausprägungen ohne Widersprüche, erstellt mithilfe der Software ScenarioWizard (Uni Stuttgart)	142

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Maßnahmen mit höchstem Potenzial - Ergebnisse des Zukunftsworkshops.....	17
Tabelle 2:	Maßnahmenbündel 1A.....	18
Tabelle 3:	Maßnahmenbündel 1B.....	18
Tabelle 4:	Maßnahmenbündel 2A.....	19
Tabelle 5:	Maßnahmenbündel 2B.....	19
Tabelle 6:	Maßnahmenbündel 3.....	19
Tabelle 7:	Maßnahmenbündel 4.....	20
Tabelle 8:	Bewertete Einflussfaktoren und mögliche Ausprägungen als Ergebnis des Szenarienworkshops.....	20
Tabelle 9:	Produktion, Ein- und Ausfuhr von Aluminiumprodukten.....	41
Tabelle 10:	Aluminiumanwendungen in Deutschland.....	45
Tabelle 11:	Umweltwirkungen der Gewinnung einer Tonne Primäraluminium... ..	46
Tabelle 12:	Produktion, Ein- und Ausfuhr von Kupferprodukten.....	47
Tabelle 13:	Kupferanwendungen in Deutschland.....	50
Tabelle 14:	Umweltwirkungen der Gewinnung einer Tonne Primärkupfer.....	51
Tabelle 15:	Ein- und Ausfuhr von Blei.....	52
Tabelle 16:	Blei- und Zinkerzeugung und Verarbeitung in Deutschland.....	52
Tabelle 17:	Bleianwendungen in Deutschland.....	55
Tabelle 18:	Umweltbelastungen der Herstellung einer Tonne Primärblei.....	56
Tabelle 19:	Ein- und Ausfuhr von Zink.....	57
Tabelle 20:	Zinkanwendungen in Deutschland.....	60
Tabelle 21:	Umweltwirkungen der Gewinnung einer Tonne Primärzink.....	61
Tabelle 22:	Energieverbräuche und CO _{2e} -Emissionen verschiedener Prozessrouten zur Herstellung der vier Fokusmetalle.....	66
Tabelle 23:	Energieverbräuche und potenzielle Einsparungen in der U.S. Aluminiumindustrie.....	66
Tabelle 24:	Schritte zur CO ₂ -neutralen Aluminiumindustrie.....	68
Tabelle 25:	Inhalte von Best-Practice Vorhaben entlang der Prozessketten.....	70
Tabelle 26:	Relevante Schlagwörter der Publikationen zu komplementären Technologien.....	72
Tabelle 27:	Inhalte von Best-Practice Vorhaben aus dem Bereich der komplementären Technologien.....	74

Tabelle 28:	Auswahl von Maßnahmen zur CO ₂ -Reduktion in der Eisen- und Stahlindustrie.....	77
Tabelle 29:	Ausgewählte Ergebnisse der Analyse	83
Tabelle 30:	Akteure aus Forschung und Beratung	87
Tabelle 31:	Akteure aus Behörden sowie Verbänden und NGOs	88
Tabelle 32:	Akteure aus der Industrie	88
Tabelle 33:	Methodische Festlegungen Delphi-Befragung	92
Tabelle 34:	Quellen zur Identifizierung des Teilnehmerkreises zur Delphi-Befragung.....	101
Tabelle 35:	Erfahrung in der NE-Metallindustrie in Jahren, erste Befragungsrunde	106
Tabelle 36:	Anwendung von Entscheidungsregeln - A	111
Tabelle 37:	Anwendung von Entscheidungsregeln - B	111
Tabelle 38:	Aufteilung der Maßnahmen in Kategorien und Bereiche des Technologiekomplexes	111
Tabelle 39:	Erfahrung in der NE-Metallindustrie in Jahren, erste und zweite Befragungsrunde	114
Tabelle 40:	Ergebnisse der 100 Mio. Euro Frage (2. Runde): Organisatorisch-konzeptionelle Maßnahmen.....	120
Tabelle 41:	Ergebnisse der 100 Mio. Euro Frage (2. Runde): Produktionsnahe/fertigungstechnische Maßnahmen.....	121
Tabelle 42:	Maßnahmen mit höchstem Potenzial - Ergebnisse des Zukunftsworkshops.....	124
Tabelle 43:	Maßnahmenbündel 1A.....	126
Tabelle 44:	Maßnahmenbündel 1B	127
Tabelle 45:	Maßnahmenbündel 2A.....	127
Tabelle 46:	Maßnahmenbündel 2B	128
Tabelle 47:	Maßnahmenbündel 3	129
Tabelle 48:	Maßnahmenbündel 4	130
Tabelle 49:	Interne Einflussfaktoren für Maßnahmen zur Ressourcenschonung	132
Tabelle 50:	Externe Einflussfaktoren für Maßnahmen zur Ressourcenschonung	134
Tabelle 51:	Ausprägungsvarianten der Einflussfaktoren	135
Tabelle 52:	Im Zukunftsworkshop identifizierte Wild Cards	137
Tabelle 53:	Ergebnisse der Bewertung: Wahrscheinlichkeit von Ausprägungsalternativen.....	138

Tabelle 54: Zuordnung der Maßnahmen zu den Szenarien in Bezug auf die Nutzung der Chancen bzw. die Reduzierung der Risiken, die sich aus den Szenarien für die Umsetzung von Ressourcenschonung ergeben..... 146

Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
BVT	Beste verfügbare Technologie
Cu	Kupfer
EE	Erneuerbare Energie
EOL	End-of-Life
GDA	Gesamtverband der Aluminiumindustrie
GJ	Gigajoule
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
k.A.	Keine Angabe
kg	Kilogramm
kt	Kilotonne
kWh	Kilowattstunde
KRS	Kayser Recycling System
MWh	Megawattstunde
NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NE-Metalle	Nichteisenmetalle
Pb	Blei
PM 10	Feinstaub (particulate matter) mit maximalem Durchmesser von 10 µm
QSL	Queneau-Schuhmann-Lurgi
Sn	Zinn
THG	Treibhausgas
TWh	Terrawattstunden
USGS	United States Geological Survey
VDMA	Verband der Maschinen- und Anlagenbauer
WVM	Wirtschaftsvereinigung Metalle
Zn	Zink

Zusammenfassung

Das Projekt DelphiNE zielt darauf ab, eine Diskussion zur Rolle der Nichteisenmetallindustrie in einer „Green Economy“ zu initiieren und mögliche Entwicklungsszenarien herauszuarbeiten. Die Umriss des Konzepts der „Green Economy“ sind im Bericht *„Towards a Green Economy. Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication“* des Umweltprogramms der Vereinten Nationen beschrieben (United Nations 2011). Hier wird Green Economy als eine Art des Wirtschaftens beschrieben, die *„das menschliche Wohlergehen steigert und soziale Gleichheit sicherstellt, während gleichzeitig Umweltrisiken verringert und die Knappheit ökologischer Ressourcen berücksichtigt werden“* (United Nations 2011, Übersetzung aus Isenmann 2013). Im entsprechenden Bericht des BMU wird Green Economy definiert *„als ein Konzept, das Umwelt und Wirtschaft positiv miteinander verbindet, um die gesellschaftliche Wohlfahrt zu steigern“* (BMU 2012).

Der schonende und energieeffiziente Umgang mit Ressourcen ist ein wichtiges Element auf dem Weg zur einer Green Economy und von zentraler Bedeutung innerhalb der Nachhaltigkeitsziele Europas und Deutschlands. Die Produktion von Nichteisenmetallen (NE-Metallen) stellt sich trotz deutlicher Effizienzsteigerungen in den letzten Jahren immer noch als rohstoff- und energieintensiv dar und ist mit hohen Umweltwirkungen verbunden.

Methodischer Ansatz

Zu den NE-Metallen zählen prinzipiell alle Metalle bzw. deren Legierungen mit einem Eisenanteil von 50 % oder weniger (Braun et al. 1999). Zur Bestimmung der langfristigen Ressourcenschonungspotenziale wurde im Projekt auf das bewährte Instrument der Delphi-Befragung (z.B. Möhrle und Isenmann 2017; Häder 2009) zurückgegriffen. Die Delphi-Befragung ist das beste verfügbare Mittel, um langfristig wirksame Entwicklungen aus gesamtwirtschaftlicher Sicht erkennen und für die Bestimmung der technologischen Position der Akteure heranziehen zu können. Dabei werden sowohl Prozess- und Produktinnovationen als auch organisatorische, strukturelle und institutionelle Innovationen berücksichtigt. Die Strukturierung des Vorgehens erfolgte im Projekt anhand der Betrachtung von Technologiekomplexen. Hierbei werden nicht allein die einzelnen Maßnahmen bzw. Technologien betrachtet. Stattdessen werden Technologien mitsamt ihrem technologischen Umstern betrachtet, das heißt inklusive relevanter vor- und nachgelagerter Prozesse sowie Randbedingungen. Die Analysen im Vorhaben beziehen sich dabei auf den Zeitraum bis zum Jahr 2030. Der geographische Fokus liegt auf Deutschland, wobei auch internationale Impulse berücksichtigt werden, soweit sich Implikationen für Deutschland ergeben. Inhaltlich wird auf die vier Massenmetalle Aluminium, Kupfer, Blei und Zink fokussiert. Metalle, die deren Behandlung beeinflussen (bspw. Gold/Edelmetalle in der Kupferrückgewinnung), werden soweit erforderlich mitbetrachtet.

Thematisch deckt die Delphi-Befragung die Inhalte ab, so wie sie methodisch gestützt durch den Technologiekomplex beschrieben und abgegrenzt wurden. Als Besonderheit werden neben den für Delphi-Befragungen typischen technologischen Aspekten zusätzlich auch organisatorisch-konzeptionelle Ansatzpunkte hervorgehoben und durch ein Fragenset berücksichtigt. Die Ergebnisse der Befragungsrunden liefern einen antwortenfokussierten Lösungsvorschlag zu den Ressourcenschonungspotenzialen in der NE-Metallindustrie, mit Details zur Höhe der Potenziale sowie der dazugehörigen zeitlichen Realisierbarkeit. Die Ergebnisse der Delphi-Befragung werden anschließend Gegenstand des Zukunftsworkshops, in dem sie den teilnehmenden Experten vorgestellt, diskutiert und bewertet werden. Die methodische Verknüpfung zwischen Delphi-Befragung und Zukunftsworkshop sowie dem anschlie-

ßenden Szenarienworkshop ist forschungsmethodisch bedeutsam und besonders geschickt: Jedes spezifische Instrument aus den Methoden der Zukunftsforschung – mit Delphi, Szenarien und Roadmaps als Kern – adressiert schwerpunktmäßig eine Relevanzdimension:

- ▶ Delphi-Befragung: Trendidentifikation von Ressourcenschonungspotenzialen
- ▶ Zukunftsworkshop: Priorisierung von Ressourcenschonungsmaßnahmen
- ▶ Szenarioworkshop: Beschreibung von Rahmenbedingungen und Bewertung

Umsetzung und Ergebnisse von Delphi-Befragung und Workshops

Die Delphi-Befragung als erster zentraler methodischer Schritt ist also darauf ausgerichtet, mögliche Ressourcenschonungspotenziale bzw. Maßnahmen mit einem potentiellen Beitrag zur Ressourcenschonung zu identifizieren. Grundlage des Fragebogens der Delphi-Befragung war zum einen eine bibliometrische Analyse zu Veröffentlichungen im Zeitverlauf mit Bezug zu den relevanten NE-Metallen und Ressourcenschonungsmaßnahmen. Zum anderen ist in Form von Workshops und Interviews eine Einbindung relevanter Akteure verschiedener Stakeholdergruppen (Industrie, Verbände, Behörden, Wissenschaft) erfolgt. Ergebnis dieses zweigleisigen Prozesses war eine strukturierte Liste von Maßnahmen mit potentielltem Beitrag zur Ressourcenschonung in der NE-Metallindustrie mit folgenden inhaltlichen Bereichen:

- ▶ gesetzliche und finanzielle Rahmenbedingungen,
- ▶ Aufbereitung und Verwertung von Schlacken, Stäuben und Schlämmen,
- ▶ Gießerei- bzw. Gussverfahren,
- ▶ Brennersysteme und erneuerbare Brennstoffe,
- ▶ Optimierung von Walzverfahren,
- ▶ Reststoff- und Abfallverfahren.

Diese Maßnahmen wurden in der ersten Befragungsrunde der Delphi-Befragung den Experten zur Bewertung ihres Potenzials (Höhe des potentiellen Beitrags zur Erreichung der Ziele der Green Economy) und ihrer zeitlichen Realisierbarkeit vorgelegt. Von 342 angeschriebenen Experten haben 165 (48%) die Umfrage zumindest teilweise beantwortet, 82 (24%) haben sie abgeschlossen. Die Ergebnisse der ersten Befragungsrunde wurden gefiltert und solche Fragen, bei denen die Beantwortung keinen klaren Trend ergeben haben, aufbereitet und in den Fragebogen zur zweiten Befragungsrunde überführt. Ergänzend wurde Kommentare der Teilnehmer aus der ersten Befragungsrunde soweit als sinnvoll erachtet in Form von Fragen in die zweite Runde aufgenommen. Die zweite Befragungsrunde resultierte in eine weitere Verdichtung der Antworten, so dass als Ergebnis ein relative klares Bild der Maßnahmen mit geringen, mittlerem und hohem Potenzial vorlag. Von den angeschriebenen 82 Teilnehmern haben 64 (79%) den Fragebogen teilweise und 46 (57%) vollständig beantwortet. Von den eingangs 130 Maßnahmen wurden auf Basis der zweistufigen Delphi-Befragung schließlich 71 zur weiteren Diskussion im Zukunftsworkshop ausgewählt.

Die Maßnahmen, welche sich aus der Delphi-Befragung zur Diskussion im Workshop ergeben haben, wurden für den Zukunftsworkshop mit den Befragungsergebnissen graphisch aufbereitet und nach vier Themenkomplexen gegliedert:

- ▶ Rahmenbedingungen und organisatorisch-konzeptionelle Entwicklungen,
- ▶ Reststoff- und Abfallverwertung sowie Verwertung und Aufbereitung von Schlacken, Stäuben und Schlämmen,
- ▶ Energienutzung und -erzeugung (EE, Strom, Wärme) und Gebäudegestaltung und

- Primärproduktion, Metallurgie und Gießereitechnik, Hoch- und Schmelzöfen sowie Brennersysteme.

Ziel des Zukunftsworkshops war eine Diskussion der Befragungsergebnisse (in Form der Maßnahmen, deren Potenzial als hoch bewertet wurde) und eine Priorisierung. Für jede zu diskutierende Maßnahme ist eine Visualisierung der Befragungsergebnisse in Form von „Tachometern“ erstellt worden, die die Durchschnittswerte der Befragungsergebnisse zu den beiden Antwortdimensionen Potenzial und Realisierbarkeit veranschaulichen. Ein Beispiel für diese Form der Visualisierung findet sich in Abbildung 41.

Abbildung 1: Visualisierung der Befragungsergebnisse in Form von Tachometern

Verbesserte Aufbereitung von Schlacken aus der Primärgewinnung (insbesondere Seltene Erden).



Tabelle 1 zeigt die Maßnahmen, deren Potential nach beiden Delphi-Befragungsrunden und dem Zukunftsworkshop am höchsten bewertet wurde, gegliedert nach den vier Themenbereichen.

Tabelle 1: Maßnahmen mit höchstem Potenzial - Ergebnisse des Zukunftsworkshops

Themenbereich	Maßnahme
Rahmenbedingungen und organisatorisch-konzeptionelle Entwicklungen	Gesetzliche und finanzielle Rahmenbedingungen: - Abgleich von widersprüchlichen Regelungen (in Bezug auf Chemikalienrecht)
	Verbesserung der Investitionsanreize für Energie- und Ressourceneffizienz Maßnahmen.
	Akzeptanz längerer Amortisationszeiten (>4 Jahre) um innovative Projekte umzusetzen.
Reststoff- und Abfallverwertung sowie Verwertung und Aufbereitung von Schlacken, Stäuben	Anpassung der Gesetzgebung (Entfernung Fehlanreize) – Verhindern, dass Energieeinsparungen die EEG-Befreiung gefährden.
	Vermeidung Downcyclings durch optimierte Schrotterfassung und –sortierung sowie durch eine bessere Erfassung der nichteisenmetallhaltigen End-of-Life-Produkte. - Sortierung gemischter Schrotte. - Einsatz innovativer Sortiertechnik mit erhöhter Metallausbeute.
	Technologische Weiterentwicklung zur Verarbeitung komplexer werdender Sekundärmaterialien.
	Produktdesign-Fertigung für ein vereinfachtes Recycling („Design-for-Recycling“).
	Mehr und bessere Kontrolle von Abfall Im- und Exporten; Vermeidung illegaler Exporte; Bessere Überwachung der Rückflüsse
	Verbesserte Aufbereitung von Schlacken aus der Primärgewinnung

Energienutzung und -erzeugung (EE, Strom, Wärme) und Gebäudegestaltung	F&E zur Schnittstellenoptimierung Aufbereitung – Metallurgie für (thermodynamisch) komplexe primäre + sekundäre Konzentrate.
	Einsatz dezentraler erneuerbarer Energie (z.B. BHKW, Windenergie).
	Gebäudegestaltung zur Optimierung von Heizung und Lüftung.
	Industrial Symbiosis: Wärme-, Strom etc. Systemverbünde nutzen / fördern für z.B. Industrieparks (mit histor. Struktur)
Primärproduktion, Metallurgie und Gießertechnik, Hoch- und Schmelzöfen sowie Brennersysteme	Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien: Lastmanagement zur Nutzung von überschüssigem EE-Strom.
	Technologische Weiterentwicklung zur Verarbeitung komplexer werdender Konzentrate.
	Prozessinterne Wärmerückführung.
	Externe Abwärmenutzung
	Industrie 4.0
	Optimierter Brenneinsatz

Diese Ressourcenschutzmaßnahmen wurden im Folgenden gebündelt und aufbereitet. Die Bündelung der Maßnahmen erfolgte nach Themenbereich, Zielbetrag (Beitrag zur Verwirklichung der Green Economy/ siehe Projektschwerpunkte) und betroffenem Akteur bzw. Akteursgruppe (Industrie/ Unternehmen, Politik/ Behörden, Wissenschaft). Es ergaben sich hieraus sechs Maßnahmenbündel, deren Struktur und Inhalte in den folgenden Tabellen zusammengefasst sind.

Tabelle 2: Maßnahmenbündel 1A

Themenbereich	Rahmenbedingungen
Zuständiger Akteur	Politik / Behörden
Zielbeitrag	Steigerung der Ressourceneffizienz (durch verbesserte Bedingungen für Umsetzung von Ressourcenschutzmaßnahmen)
Einzelmaßnahmen/ Bausteine	Ableich von widersprüchlichen Regelungen im Chemikalienrecht Verbesserung der Investitionsanreize für Energie- und Ressourceneffizienzmaßnahmen Anpassung der Gesetzgebung, so dass verhindert wird, dass durch Energieeinsparungen die EEG-Befreiung gefährdet wird
Zeitliche Realisierbarkeit	2020 bis 2025

Tabelle 3: Maßnahmenbündel 1B

Themenbereich	Rahmenbedingungen und organisatorisch-konzeptionelle Entwicklungen
Zuständiger Akteur	Unternehmen, Shareholder & Investoren
Zielbeitrag	Steigerung der Ressourceneffizienz (durch verbesserte Bedingungen für Umsetzung von Ressourcenschutzmaßnahmen)
Einzelmaßnahmen/ Bausteine	Akzeptanz längerer Amortisationszeiten (>4 Jahre) um innovative Projekte umzusetzen.
Zeitliche Realisierbarkeit	2020 bis 2025

Tabelle 4: Maßnahmenbündel 2A

Themenbereich	Reststoff- und Abfallverwertung sowie Verwertung und Aufbereitung von Schlacken und Stäuben
Zuständiger Akteur	Primär: Industrie, Sekundär: Wissenschaft
Zielbeitrag	Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe, Recycling von bisher ungenutzten Abfällen
Einzelmaßnahmen/ Bausteine	Optimierte Schrotterfassung und –sortierung Optimierte Erfassung von End-of-Life Produkten Technologische Weiterentwicklung zur Verarbeitung komplexer werdender Sekundärmaterialien; F&E zur Schnittstellenoptimierung Aufbereitung – Metallurgie für (thermodynamisch) komplexe primäre + sekundäre Konzentrate Verbesserte Aufbereitung von Schlacken aus der Primärgewinnung Produktdesign (+ -fertigung) für ein vereinfachtes Recycling („Design-for-Recycling“)
Zeitliche Realisierbarkeit	2020 bis 2025 für Einsatz vorhandener Verfahren und Verfahren mit geringerem Entwicklungsaufwand 2025 bis 2030 für Maßnahmen mit höherem Entwicklungsaufwand

Tabelle 5: Maßnahmenbündel 2B

Themenbereich	Reststoff- und Abfallverwertung sowie Verwertung und Aufbereitung von Schlacken und Stäuben
Zuständiger Akteur	Politik / Behörden
Zielbeitrag	Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe, Recycling von bisher ungenutzten Abfällen
Einzelmaßnahmen/ Bausteine	Mehr und bessere Kontrolle von Abfall Im- und Exporten; Vermeidung illegaler Exporte, bessere Überwachung von Rückflüssen Anforderungen an Design-for-Recycling Forschungs- und Investitionsförderung zu den Einzelmaßnahmen aus Maßnahmenbündel 2A
Zeitliche Realisierbarkeit	±2025

Tabelle 6: Maßnahmenbündel 3

Themenbereich	Energienutzung und –erzeugung & Gebäudegestaltung
Zuständiger Akteur	Industrie
Zielbeitrag	Einsatz erneuerbarer Energien zur dezentralen Stromversorgung der Unternehmen, Substitution von fossilen Brennstoffen und Reduktionsmitteln
Einzelmaßnahmen/ Bausteine	Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien: Lastmanagement zur Nutzung von überschüssigem EE-Strom Einsatz dezentraler erneuerbarer Energie (z.B. BHKW, Windenergie) Gebäudegestaltung zur Optimierung von Heizung und Lüftung Industrial Symbiosis: Nutzung der Vorteile von Systemverbänden (Nutzung von Abwärme in Industrieparks etc.)

	Prozessinterne Wärmerückführung Externe Abwärmenutzung
Zeitliche Realisierbarkeit	±2025

Tabelle 7: Maßnahmenbündel 4

Themenbereich	Produktionstechnik (Metallurgie, Gießereitechnik, Hoch- und Schmelzöfen, Brennersysteme)
Zuständiger Akteur	Industrie
Zielbeitrag	Steigerung der Ressourceneffizienz
Einzelmaßnahmen/ Bausteine	Technologische Weiterentwicklung zur Verarbeitung komplexer werdender Konzentrate (Schwermetallgehalte, Gehalte sonstiger Elemente) Industrie 4.0 Optimierter Brennereinsatz
Zeitliche Realisierbarkeit	2020-2025

Rahmenszenarien für Ressourcenschonungsstrategien

Als letzter methodischer Schritt wurde der Szenarienworkshop durchgeführt. Ziel war es hier, Zukunftsbilder für eine ressourcenschonende NE-Metallindustrie zu entwerfen in denen später die Maßnahmen für eine Umsetzung eingepasst werden können. Dafür wurden zentrale interne und externe Einflussfaktoren identifiziert und in eine konsistente Beschreibung von Zukunftsbildern überführt. Für die Einflussfaktoren wurden dann zukünftige Ausprägungsvarianten diskutiert und in Form von Zukunftsprojektionen zusammengefasst. Um der inhärenten Unsicherheit bei der Szenariendarstellung Rechnung zu tragen, wurden zusätzlich Ereignisse und Entwicklungen identifiziert, die einen disruptiven Einfluss auf die angenommenen Projektionen haben könnten, sogenannte „Wild Cards“. Die von den Experten erarbeiteten Einflussfaktoren wurden schließlich im Workshop bzgl. ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit bewertet. Die Ergebnisse dieser Bewertung sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 8: Bewertete Einflussfaktoren und mögliche Ausprägungen als Ergebnis des Szenarienworkshops

Einflussfaktor	Ausprägung A	Ausprägung B	Ausprägung C
Staatliche Förderung und Anreizsetzung	<ul style="list-style-type: none"> Maßgeschneidert (-) 	<ul style="list-style-type: none"> Bleibt gleich (+) 	<ul style="list-style-type: none"> Wird reduziert (~)
Globale Nachfrage und Konsum	<ul style="list-style-type: none"> Nachfrage bleibt konstant (-) 	<ul style="list-style-type: none"> Nachfrage steigt (+) 	<ul style="list-style-type: none"> Nachfrage schwankt (~)
Bevölkerungsentwicklung und Fachkräftemangel	<ul style="list-style-type: none"> Fachkräftemangel bleibt konstant (~) Überalterung im Berufsleben bleibt erhalten (~) 	<ul style="list-style-type: none"> Fachkräftemangel reduziert (=Verbesserung) (~) Überalterung im Berufsleben nimmt ab (~) 	(keine Ausprägung C)

Energie- und Rohstoffpreise	<ul style="list-style-type: none"> • Stark steigend (-) • Anstieg in D, EU, global unterschiedlich stark (-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Zyklus (der Rohstoffpreise) (+) • Globale Harmonisierung (+) 	(keine Ausprägung C)
Globale Rohstoff- und Metallmärkte	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit: gut (+) • Handelshemmnisse: Zunahme (+) • Nachfrage: steigt (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit: Abnahme (-) • Handelshemmnisse: Abnahme (wg. z.B. TTIP) (-) • Nachfrage: sinkt (-) 	(keine Ausprägung C)
Umwelt-, Energie- und Ressourcenschutzgesetzgebung	<ul style="list-style-type: none"> • Emissionsauflagen: Zunahme + Verzerrungen (-) • Politische Zusatzkosten: Zunahme + Verzerrungen (-) • Stoffverbote und Zulassungen: Zunahme (wg. Eigenschaften) (-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Emissionsauflagen: EU Harmonisierung (+) • Politische Zusatzkosten: EU Harmonisierung (+) • Stoffverbote und Zulassungen: Risikobasiert (+) 	(keine Ausprägung C)
Innovationsklima	<ul style="list-style-type: none"> • Flächendeckende Innovationsförderung für Effizienz (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Innovationsförderung für Effizienz verliert an Bedeutung (-) 	(keine Ausprägung C)
Nachhaltigkeitsstrategie	<ul style="list-style-type: none"> • Nachhaltigkeitsstrategie im Unternehmen verankert: Flächendeckend eingesetzt (-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachhaltigkeitsstrategie im Unternehmen: Nachhaltigkeitsgedanke verliert an Bedeutung (+) 	(keine Ausprägung C)
Bürokratie	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwand der Zulassung neuer Produkte: sinkt (+) • Einfluss auf Produktinnovation: positiv (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwand der Zulassung neuer Produkte: bleibt gleich (-) • Einfluss auf Produktinnovation: keine (-) 	(keine Ausprägung C)
Wertschöpfungsstrategie	<ul style="list-style-type: none"> • Ressourcenschonende Kooperationen entlang von Wertschöpfungsketten in allen NE-Sektoren (-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Abschottung von Elementen der Wertschöpfungsketten, Fokus auf Kernprodukte (+) 	(keine Ausprägung C)

Personalstrategie	<ul style="list-style-type: none"> • Hochmotivierte Mitarbeiter in Betrieben und ausreichendes Bildungsangebot (~) 	<ul style="list-style-type: none"> • Eklatanter Fachkräftemangel und schlechte Arbeits- und Weiterentwicklungsbedingungen (~) 	(keine Ausprägung C)
Gesellschaftspolitische Positionierung	<ul style="list-style-type: none"> • Vorausschauende Umsetzung von Regulierungen und gesellschaftlichen Ansprüchen (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Reagieren statt agieren (auf gesellschaftliche Ansprüche) (-) 	(keine Ausprägung C)
Digitalisierung der Produktion	<ul style="list-style-type: none"> • Maximale Transparenz und resultierende Ressourcenschonung (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinstmengenproduktion (ineffizient) und Verfehlung der Flexibilitäts- und Transparenzziele (-) 	(keine Ausprägung C)

Ein plus (+) signalisiert die jeweils als wahrscheinlichste Variante gewählte Ausprägung, ein minus (-) die jeweils als unwahrscheinlichste gewählte. Ein (~) heißt, es gab keine wahrscheinlichste Ausprägung.

Als Ergebnis des Projektes liegen Bündel möglicher Ressourcenschonungsmaßnahmen für die Nichteisenmetallindustrie vor. Im Szenarienworkshop wurden ergänzend interne und externe Einflussfaktoren sowie Wild Cards erarbeitet und bewertet. Auf dieser Basis wurden konsistente Szenarien nach der Cross-Impact-Bilanz-Methode erstellt. Von fünf konsistenten Szenarien wurden zwei möglichst verschiedene ausgewählt, die *Rückenwind* und *Gegenwind* benannt wurden.

Im Szenario „Rückenwind“ überwiegen positive Rahmenbedingungen zur Umsetzung von Ressourcenschonungsmaßnahmen. Auf der globalen Ebene herrscht eine schwankende Nachfrage nach NE-Metallen mit einer im Durchschnitt sinkenden Tendenz. Die globale Verfügbarkeit von Metallen und Metallrohstoffen nimmt zwar ebenfalls tendenziell ab, der Handel ist aber frei von staatlichen Einschränkungen, so dass sich die Preise global gleichmäßig entwickeln können. Das gilt ebenfalls für die Energiepreise, die zwar ebenso schwanken wie die allgemeine Nachfrage, sich aber harmonisiert entwickeln. Der Fachkräftemangel und die Überalterung der Belegschaft in Deutschland konnten reduziert werden.

Die staatliche Förderung und Regulierung zeigt sich in diesem Szenario förderlich für Unternehmen und Produktinnovationen. So sind die staatlichen Förder- und Anreizprogramme maßgeschneidert auf spezifische Anforderungen der Branche und auf europäischer Ebene sind die Emissionsauflagen harmonisiert. Dadurch ergeben sich für Mitbewerber auf dem europäischen Markt identische Ausgangsbedingungen. Für die Stoffverbote in Produkten und Sekundärmaterialien gelten risikobasierte Grenzwerte auf der Basis von toxikologischen Untersuchungen.

Die allgemeine strategische Ausrichtung der Unternehmen und die Motivationslage bei den Mitarbeitern spiegeln die günstigen Bedingungen für eine ressourcenschonende Metallproduktion wieder. Bei den Unternehmen der NE-Branche sind Nachhaltigkeitsstrategien flächendeckend verankert und Kooperationen für Ressourcenschonung entlang von Wertschöpfungsketten sind weit verbreitet. Die Unternehmen sind darauf bedacht, gesellschaftliche Anforderungen früh zu erkennen und proaktiv umzusetzen, womit teilweise der Regulierungsbedarf reduziert werden kann. Die Mitarbeiter sind in Bezug auf Nachhaltigkeitsthemen und Ressourceneffizienz hoch motiviert und profitieren von weitrei-

chenden Weiterbildungsangeboten. Die Digitalisierung der Produktion wird dazu genutzt, größtmögliche Transparenz über stoffliche und energetische Effizienz herzustellen und somit die darin liegenden Potenziale für Ressourcenschonung effektiv zu nutzen.

Im Szenario Gegenwind überwiegen die ungünstigen Rahmendbedingungen für Ressourcenschonung. Zunächst einmal ähnlich gelagert wie im ersten Szenario sind die Rahmenbedingungen auf der globalen Ebene. Hier herrscht eine schwankende Nachfrage nach NE-Metallen mit einer im Durchschnitt sinkenden Tendenz. Die globale Verfügbarkeit von Metallen und Metallrohstoffen nimmt zwar ebenfalls tendenziell ab, der Handel ist aber frei von staatlichen Einschränkungen, so dass sich die Preise global gleichmäßig entwickeln können. Das gilt ebenfalls für die Energiepreise, die zwar ebenso schwanken wie die allgemeine Nachfrage, sich aber harmonisiert entwickeln. Ungünstig auf Ressourcenschonungspotenziale wirkt sich der unveränderte Fachkräftemangel und der Anstieg des durchschnittlichen Alters der Beschäftigten aus.

In Bezug auf die Zulassung neuer und innovativer Produkte ergeben sich potenziell hemmende Einflüsse aus dem zunehmenden Stoffverboten und den hohen und europaweit ungleichen Emissionsauflagen. Die staatliche Förderung in Deutschland bleibt dabei maßgeschneidert auf spezifische Bedarfe der NE-Metallindustrie und ist flächendeckend zur Förderung von Innovation verfügbar.

Auf der Seite der Unternehmen im NE-Metallbereich herrscht eine abwartende und wenig auf Nachhaltigkeit orientierte Einstellung vor. Nachhaltigkeit verliert dabei an Bedeutung, Unternehmen reagieren eher auf gesellschaftliche Anforderungen anstatt sie zu antizipieren und Elemente der Wertschöpfungsketten grenzen sich eher voneinander ab anstatt gemeinsam nach Lösungen für mehr Ressourcenschonung zu suchen. Auch in Bezug auf den Fachkräftemangel finden die Unternehmen keine Antworten, die Arbeitsbedingungen werden zunehmend unattraktiv und eine Weiterbildung der eigenen Mitarbeiter, insbesondere in Richtung Ressourcenschonung, bleibt aus. Auch die Digitalisierung bleibt in Bezug auf Ressourcenschonung und Transparenz hinter den Erwartungen zurück. Sie führt stattdessen zu einer stofflich- und energetisch ineffizienten Kleinstmengenproduktion und verfehlt zudem die Ziele von Transparenz entlang der Wertschöpfungskette, ohne die eine Realisierung von Ressourcenschonungspotenzialen schwieriger wird.

Betrachtet man die Einschätzung der Experten bezüglich der Erwartbarkeit der verschiedenen Treiberausprägungen und weist diese jedem der beiden Szenarien zu, so scheint das Szenario „Rückenwind“ etwas wahrscheinlicher eingeschätzt zu werden: sechs der Treiberausprägungen dieses Szenarios werden jeweils als die wahrscheinlichere Variante eingeschätzt, während es beim Szenario „Gegenwind“ nur vier sind.

Diese beiden Szenarien können nachfolgend (nicht mehr innerhalb dieses Projektes) als Gerüst dienen, um die in der ersten Phase des Projekts gesammelten Maßnahmenvorschläge in einen sinnvollen Kontext zu stellen und sind damit gleichzeitig die Vorarbeit für eine konkrete Roadmap, um die Ziele der Ressourcenschonung zu erreichen.

Summary

The project DelphiNE aimed at initiating a discussion about the role of the non-ferrous metal industry in a "green economy" and at creating possible scenarios for a future development. The concept of a "Green Economy" is described in the report "Towards a Green Economy: Towards Sustainable Development and Poverty Reduction" by the United Nations Environment Program (United Nations 2011). Green economy is described as an economy that results in "improved human well-being and social equity, while significantly reducing environmental risks and ecological scarcities" (United Nations 2011). In a corresponding BMU report, Green Economy is defined as "a concept that connects the environment and the economy in a positive way to increase social welfare" (BMU 2012).

The responsible and energy-efficient use of resources is an important element on the road to a green economy and of crucial importance within the sustainability goals of Europe and Germany. Despite considerable improvement in efficiency in the past years, the production of non-ferrous metals, however, is still quite raw material and energy-intensive and is associated with high environmental impacts.

Methodological approach

Non-ferrous metals include all metals or their alloys with an iron content of 50% or less (Braun et al. 1999). To identify long-term potentials for resource savings, the established instrument of the Delphi survey (for example, Möhrle and Isenmann 2017, Häder 2009) has been used in the project. The Delphi survey is the best available instrument to identify long-term developments from a macroeconomic perspective and to help determine the technological position of the relevant market players and stakeholders. Both process and product innovations as well as organizational, structural and institutional innovations are considered. The approach has been structured on the basis of the consideration of "technology complexes". In technology complexes measures and technologies are not considered separately, but along with their technological peripheral systems (i.e. including relevant upstream and downstream processes) and boundary conditions. The analyzes in the project consider the time period up to the year 2030. The geographic scope is Germany, while international impulses are taken into account as far as implications for Germany are concerned. In terms of material scope, the four mass metals aluminum, copper, lead, and zinc are considered. Metals influencing their processing (e.g. gold / precious metals in the copper recovery) are considered as far as necessary.

The specific content of the Delphi survey is determined by the technology complex. In addition to the technological aspects typical for Delphi surveys, organizational-conceptual aspects are also addressed by specific questions. The results of the Delphi survey provide a response-focused solution for the resource saving potentials in the non-ferrous metal industry. This includes details on the magnitude of the respective potential as well as an estimate for the timeframe for realization. Subsequently, the results of the Delphi survey have been discussed in the "future workshop" among the participating experts. The methodological link between the Delphi survey and the "future workshop" as well as the subsequent "scenario workshop" is methodologically consistent. Each chosen method of future research - with Delphi, scenarios and roadmaps as core - focuses on a different relevance dimension:

- ▶ Delphi Survey: Trend Identification of Resource Saving Potentials
- ▶ Future workshop: prioritization of resource saving measures
- ▶ Scenario workshop: description of framework conditions and assessment

Realization and results of the Delphi survey and workshops

The Delphi survey as the first central methodological step aims at identifying potential resource saving potentials and measures. The basis for the questionnaire of the Delphi survey was, on the one hand, a bibliometric analysis of publications with regard to the relevant non-ferrous metals and resource conservation measures. On the other hand, the involvement of relevant actors from different stakeholder groups (industry, associations, authorities, science) which took place in the form of workshops and interviews. The result of this two-track process was a structured list of measures with a potential contribution to resource conservation in the non-ferrous metal industry with the following areas:

- ▶ Legal and financial framework,
- ▶ Treatment and utilization of slags, dusts and sludges,
- ▶ Foundry and casting processes,
- ▶ Burner systems and renewable fuels,
- ▶ Optimization of rolling processes,
- ▶ Residue and waste disposal.

These measures were presented to the experts in the first round of the Delphi survey to assess their level of potential (the potential contribution to achieving the green economy's objectives) and the potential timeframe for realization. Of the 342 experts which have been invited to the first round of the survey, 165 (48%) answered the survey at least partially, 82 (24%) have completed it. The results of the first round were then filtered, and such questions, for which the answer did not lead to a clear trend, were transferred to the questionnaire for the second round. The second round resulted in a relatively clear picture of the measures with low, medium and high potential. Of the 82 participants of the second round, 64 (79%) answered the questionnaire partially and 46 (57%) fully. Of the initially identified 130 measures for resource savings, 71 were selected on the basis of the Delphi survey for further discussion in the "future workshop".

For the "future workshop", the result from the Delphi survey have been structured into four areas:

- ▶ Framework conditions and organizational and conceptual developments,
- ▶ Residual and waste recycling as well as recovery and processing of slags, dusts and sludges,
- ▶ Energy use and generation (renewable energies, electricity, heat) and building design and construction
- ▶ Primary production, metallurgy and foundry technology, furnaces and melting furnaces as well as burner systems.

The aim of the future workshop was to discuss the results of the survey and to further prioritize the measures. For each measure to be discussed, a visualization of the results of the survey has been prepared in the form of "tachometers", which summarize the Delphi results. An exemplary visualization can be found in Figure 1.

Figure 1: Exemplary visualization of Delphi results

Verbesserte Aufbereitung von Schlacken aus der Primärgewinnung (insbesondere Seltene Erden).



Table 1 summarizes the measures with the highest potential based on the results of both, Delphi survey and “future workshop” structured according to the four areas.

Table 1: Measures for resources savings with highest potential

Area	Measure for resource savings
Framework conditions and organizational and conceptual developments	Legal and financial boundary conditions: <ul style="list-style-type: none"> - Harmonization of conflicting regulations (with regard to regulations of chemicals)
	Improvement of investment incentives for energy and resource efficiency measures
	Acceptance of longer payback times (> 4 years) to implement innovative projects.
	Adjustment of legislation (removal of disincentives)
Residual and waste recycling as well as recovery and processing of slags, dusts and sludges	Avoidance of down-cycling by optimized collection and sorting of scrap, as well as better detection of non-ferrous end-of-life products. <ul style="list-style-type: none"> - sorting of mixed scrap. - Use of innovative sorting technology with increased metal yield.
	Technological development for the processing of more complex secondary materials.
	Product design for improved recyclability ("Design-for-Recycling").
	More and better control of waste imports and exports; Avoiding illegal exports; Better monitoring of EOL flows
	Improved processing of slags from primary production
	R & D for optimizing the link between beneficiation and metallurgy for (thermodynamically) complex primary + secondary concentrates.
	Use of decentralized renewable energy (such as CHP, wind energy)
Energy use and generation (renewable energies, electricity, heat) and building design and construction	Building design to optimize heating and ventilation.
	Industrial symbiosis: heat, electricity, etc. Use synergies within e.g. Industrial parks (with historical structure)
	Increased use of renewable energies: Load management to use excess EE electricity.
	Technological development for the processing of complex concentrates.
	Internal heat recirculation.
	External use of waste heat

Primary production, metallurgy and foundry technology, furnaces and melting furnaces as well as burner systems

Industry 4.0
Optimized burner use

These resource saving measures were then transferred to six bundles which are grouped according to the addressed area, possible contribution (contribution to the realization of the Green Economy) and affected stakeholder group (industry / enterprises, politics / authorities, science). The result are six sets of measures which are summarized in the following tables.

Table 2: Bundle of measures 1A

Area	Framework conditions
Involved stakeholder group	Politics / authorities
Contribution	Increased resource efficiency (through improved framework conditions for the implementation of resource saving measures)
Single measures / elements	Harmonization of conflicting regulations for chemicals Improvement of investment incentives for energy and resource efficiency measures Adaptation of the legislation with regard to renewable energies act (EEG)
Timeframe	2020 to 2025

Table 3: Bundle of measures 1B

Area	Framework conditions and organizational and conceptual developments
Involved stakeholder group	Companies, shareholders and investors
Contribution	Increased resource efficiency (through improved conditions for the implementation of resource protection measures)
Single measures / elements	Acceptance of longer payback times (> 4 years) to implement innovative projects.
Timeframe	2020 to 2025

Table 4: Bundle of measures 2A

Area	Recycling and waste treatment As well as recovery and treatment of slags and dusts
Involved stakeholder group	Primary: industry, secondary: science
Contribution	Substitution of primary raw materials by secondary raw materials, recycling of previously unused waste

Single measures / elements	<p>Optimized scrap collection and sorting</p> <p>Optimized collection of end-of-life products</p> <p>Technological development for the processing of more complex secondary materials.</p> <p>R & D for optimizing the link between beneficiation and metallurgy for (thermodynamically) complex primary + secondary concentrates.</p> <p>Product design for improved recyclability ("Design-for-Recycling").</p>
Timeframe	<p>2020 to 2025 for existing processes and processes with a lower development effort</p> <p>2025 to 2030 for measures with a higher development effort</p>

Table 5: Bundle of measures 2B

Area	<p>Recycling and waste treatment</p> <p>As well as recovery and treatment of slags and dusts</p>
Involved stakeholder group	<p>Politics / authorities</p>
Contribution	<p>Substitution of primary raw materials by secondary raw materials, recycling of previously unused waste</p>
Single measures / elements	<p>More and better control of waste imports and exports; Avoiding illegal exports; Better monitoring of EOL flows</p> <p>Requirements for DfR</p> <p>R&D funding for measures from bundle 2A</p>
Timeframe	<p>±2025</p>

Table 6: Bundle of measures 3

Area	<p>Energy use and generation and building design and construction</p>
Involved stakeholder group	<p>Industry</p>
Contribution	<p>Use of renewable energies for the decentralized power supply of companies, substitution of fossil fuels and reducing agents</p>
Single measures / elements	<p>Increased use of renewable energies: Load management to use excess renewable electricity.</p> <p>Use of decentralized renewable energy (such as CHP, wind energy)</p> <p>Building design to optimize heating and ventilation.</p> <p>Industrial symbiosis: heat, electricity, etc. Use synergies within e.g. Industrial parks (with historical structure)</p> <p>Internal heat recirculation.</p> <p>External use of waste heat</p>
Timeframe	<p>±2025</p>

Table 7: Bundle of measures 4

Area	Production technology (metallurgy and foundry technology, furnaces and melting furnaces as well as burner systems)
Involved stakeholder group	Industry
Contribution	Increasing resource efficiency
Single measures / elements	Technological development for the processing of complex concentrates. Industry 4.0 Optimized burner use
Timeframe	2020 to 2025

Framing scenarios for resource saving strategies

The “scenario workshop” was the last major methodical step in the project. The workshop aimed at identifying possible futures for a resource saving non-ferrous metal industry which allow for an implementation of the identified measures. These scenarios are to be understood as the potential future situations under which the above identified measures for resource savings would have to be operationalized. Since the future is uncertain, there are several framing scenarios to be considered. The scenario generation includes the identification of internal and external factors of influence. In order to account for the inherent uncertainty in the scenario work so-called "wild cards" have been identified as well, i.e., events and developments which might have a disruptive effect on the assumed projections. The factors of influence identified by the experts were finally evaluated in the workshop with regard to their probability of occurrence. The results of this evaluation are summarized in the following table. Together with the resource saving measures, the scenarios could be used to define roadmaps towards a future resource-light NF metals industry.

Table 8: Assessed factors of influence and possible manifestations

Factor	Manifestation A	Manifestation B	Manifestation C
Public funding and incentives	<ul style="list-style-type: none"> Tailored (-) 	<ul style="list-style-type: none"> Unchanged (+) 	<ul style="list-style-type: none"> Reduced (~)
Global demand and consumption	<ul style="list-style-type: none"> Unchanged (-) 	<ul style="list-style-type: none"> Increasing (+) 	<ul style="list-style-type: none"> Volatile (~)
Population development and skilled worker shortage	<ul style="list-style-type: none"> Skilled worker shortage constant (~) Overaging in professional life unchanged (~) 	<ul style="list-style-type: none"> Skilled worker shortage reduced (~) Overaging in professional life reduced (~) 	NN
Energy and raw material prices	<ul style="list-style-type: none"> Significant increase (-) Increase differing in GER, EU, globally (-) 	<ul style="list-style-type: none"> Raw material cycle (+) Global harmonisation (+) 	NN
Global commodity and metal markets	<ul style="list-style-type: none"> Availability: good (+) Trade barriers: increase (+) Demand: increase (+) 	<ul style="list-style-type: none"> Availability: Decrease (-) Trade barriers: decrease (-) 	NN

Environmental, energy and resource protection legislation	<ul style="list-style-type: none"> • Regulations regarding emissions: Increase (-) • Additional political costs: Increase (-) • Restriction of hazardous substances: Increase (-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Demand: decrease (-) • Regulations regarding emissions: EU-wide harmonisation (+) • Additional political costs: decrease (+) • Restriction of hazardous substances: Increase: risk based (+) 	NN
Climate of innovation	<ul style="list-style-type: none"> • Increase in public funding for innovations for resource efficiency (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Decrease in public funding for innovations for resource efficiency (-) 	NN
Sustainable development strategy	<ul style="list-style-type: none"> • Sustainability strategies consequently adopted in companies (-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Sustainability strategies loses importance (+) 	NN
Bureaucracy	<ul style="list-style-type: none"> • Effort for approval of new products: decreasing (+) • Impact on product innovation: positive (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Effort for approval of new products: unchanged (-) • Impact on product innovation: none (-) 	NN
Added value strategy	<ul style="list-style-type: none"> • Cooperation for resource saving throughout the non-ferrous metal industry value chain (-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Isolation of elements within value chain, focus on core products (+) 	NN
HR strategy	<ul style="list-style-type: none"> • Highly motivated personnel and sufficient advanced training offers (~) 	<ul style="list-style-type: none"> • Significant shortage of skilled labor, bad working conditions and lack of advanced training offers (~) 	NN
Socio-political positioning	<ul style="list-style-type: none"> • Anticipatory adaption of regulations and societal demands (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Reactive instead of pro-active (with regard to societal demands) (-) 	NN
Digitalization of production	<ul style="list-style-type: none"> • Maximum of transparency and resulting saving of resources (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Smallest volume production (inefficient) and missed flexibility and transparency goals (-) 	NN

A plus (+) indicates the most likely variant, a minus (-) the most unlikely. A (~) means that there was no most probable manifestation.

As a result of the project, there are bundles of possible resource saving measures for the non-ferrous metal industry. In the scenario workshop, internal and external factors of influence as well as wild-cards were compiled and evaluated. On this basis, consistent scenarios were developed using the

cross-impact balance method. From five consistent scenarios, two different scenarios were chosen and further elaborated. These two scenarios have been named the backwind and the headwind scenario.

In the "backwind" scenario, positive conditions prevail for the implementation of resource conservation measures. On the global level, there is a fluctuating demand for non-ferrous metals with a declining trend. Although the global availability of metals and metal raw materials is also likely to decline, trade is free from governmental or regulatory constraints and barriers, which means that prices can evolve globally. This also applies to energy prices, which fluctuate as well as general demand, but are developing globally harmonized. The shortage of skilled workers and the aging of the workforce in Germany could be reduced.

In this scenario, governmental support and regulation is beneficial for companies and product innovations. The state subsidy and incentive programs are tailored to specific requirements of the industry and the emission requirements are harmonized at European level. This results in identical starting conditions for competitors on the European market. For the prohibition of substances in products and secondary materials, risk-based limit values are based on toxicological investigations.

The general strategic orientation of the companies and the motivation situation among the employees reflect the favorable conditions for a resource-conserving metal production. In the case of companies in the non-ferry sector, sustainability strategies are anchored in a comprehensive manner and co-operations for resource protection along value-added chains are widespread. The companies are keen to recognize societal requirements at an early stage and implement them proactively, which can partly reduce regulatory requirements. Employees are highly motivated with regard to sustainability and resource efficiency and benefit from extensive training opportunities. The digitization of production is used to produce the greatest possible transparency regarding material and energy efficiency and thus to make effective use of the potential resources for resource conservation.

In the headwind scenario, unfavorable framework conditions for resource conservation prevail. Again, at a global level there is a fluctuating demand for non-ferrous metals. While the global availability of metals and raw materials is declining, trade is free from barriers, which means that prices can develop globally harmonized. This also applies to energy prices. The unchanged shortage of skilled labor and the increase in the average age of the employees have a negative effect on the potential for resource savings and efficiency.

With regard to the authorization of new and innovative products, there are potentially negative effects resulting from the increasing regulations of substances and the high emission standards which are not harmonized across Europe.

Within the non-ferrous metals industry, there a wait and see attitude is prevalent which is not oriented towards sustainability. Sustainability is becoming less important, companies are more likely to respond to social requirements rather than anticipate them, and elements of the value chains are more likely to be interdependent rather than looking for solutions for more resource conservation at a system level. With regard to the shortage of skilled labor, companies struggle to find any answers, the working conditions become increasingly unattractive, and further training of their own employees, especially in the direction of resource conservation, is still lacking. Digitalization also remains below expectations in terms of resource conservation and transparency. Instead, it leads to a materially and energetically inefficient small-scale production and also misses the objectives of transparency along the value chain.

If one considers the experts' assessment of the probability of the different manifestations of internal and external factors and assigns them to the two scenarios, the scenario "backwind" appears somewhat more likely: six of the driver expressions of this scenario are considered the more likely, while in the "headwind" scenario it is only four.

The two scenarios can be used as a frame (no longer within this project) in order to put the proposed measures in the first phase of the project into a meaningful context, and provide the basis for a concrete roadmap.

1 Einleitung

Der schonende und energieeffiziente Umgang mit Ressourcen ist ein wichtiges Element der Nachhaltigkeitsziele Europas und Deutschlands. Die Produktion von Nichteisenmetallen (NE-Metallen) stellt sich trotz deutlicher Effizienzsteigerungen in den letzten Jahren immer noch als rohstoff- und energieintensiv dar und ist mit hohen Umweltwirkungen verbunden. So betrug der Energieverbrauch der NE-Metallindustrie etwa 25,5 TWh im Jahr 2008 (4,5 % des deutschen Gesamtverbrauchs), die Treibhausgasemissionen beliefen sich auf etwa 14 Mio. t CO_{2e} (1,5 % der deutschen Emissionen in 2008) (UBA 2014).

Zu den NE-Metallen zählen prinzipiell alle Metalle bzw. deren Legierungen mit einem Eisenanteil von 50 % oder weniger (Braun et al. 1999). Die am häufigsten verwendeten NE-Metallen sind Aluminium, Kupfer, Blei und Zink (siehe bspw. WVM 2013).

Ressourcenschonung und Entwicklungspotenziale beim Umgang mit NE-Metallen lassen sich in verschiedene Bereiche unterteilen, zwischen denen aber durchaus eine Reihe von Synergien und Konflikten bestehen:

- ▶ Ressourceneinsatz verringern
 - Input effizienter nutzen
 - Kreisläufe schließen (Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe; Recycling von bisher ungenutzten Abfällen) und Energie in Kaskaden nutzen
 - Verluste vermeiden, insbesondere dissipative Verluste
- ▶ Anteil erneuerbarer Ressourcen, insbesondere Energie, erhöhen; Energieeffizienz steigern
 - Substitution von fossilen Brennstoffen und Reduktionsmitteln
 - Einsatz erneuerbarer Energien zur dezentralen Stromversorgung der Unternehmen
 - Umweltbelastungen durch Emissionen verringern

Eine besondere Dynamik für die NE-Metallbranche in Deutschland ergibt sich aus der Energiewende. Die ambitionierten Ziele zum Ausbau erneuerbarer Energien (35 % bis 2020, 80 % bis 2050, bezogen auf die Stromversorgung) sind mit einer Steigerung der Bedeutung von NE-Metallen für die deutsche Wirtschaft verbunden. Dies ergibt sich aus den verschiedenen Zukunftstechnologien mit Umweltlastungspotentialen, wie Photovoltaik- und Windenergieanlagen, Speicher, Elektromobilität, Brennstoffzellen etc., die Bestandteil der meisten Transformationsstrategien zu einer „Green Economy“ sind (vgl. United Nations 2011; BMU & BDI 2012). Für diese Wandlung des Energiesektors werden zahlreiche NE-Metalle gar - bezogen auf ihre Bedeutung und ihr Versorgungsrisiko - als „kritisch“ betrachtet (vgl. Achzet et al. 2011; American Physical Society & Materials Research Society 2011; European Commission 2011; Moss et al. 2011; Erdmann & Behrendt 2011). Gleichzeitig muss die NE-Metallbranche jedoch auch technische Herausforderungen zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Nutzung erneuerbarer Energien meistern.

1.1 Green Economy

20 Jahre nach dem Weltgipfel von 1992 wurde 2012 erneut in Rio de Janeiro von den Vereinten Nationen eine Konferenz zur nachhaltigen Entwicklung ausgerichtet („Rio+20“). Schwerpunktthema dieses Weltgipfels war „Green Economy im Kontext nachhaltiger Entwicklung und Armutsreduzierung“.

Die Umriss des Konzepts der „Green Economy“ sind im Bericht „Towards a Green Economy. Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication“ des Umweltprogramms der Vereinten Nationen

beschrieben (United Nations 2011). Hier wird Green Economy als eine Art des Wirtschaftens beschrieben, die *„das menschliche Wohlergehen steigert und soziale Gleichheit sicherstellt, während gleichzeitig Umweltrisiken verringert und die Knappheit ökologischer Ressourcen berücksichtigt werden“* (United Nations 2011, Übersetzung aus Isenmann 2013). Im entsprechenden Bericht des BMU wird Green Economy definiert *„als ein Konzept, das Umwelt und Wirtschaft positiv miteinander verbindet, um die gesellschaftliche Wohlfahrt zu steigern“* (BMU 2012).

Die einzelnen Elemente des Weges hin zu einer „Green Economy“ lassen sich thesenartig zusammenfassen (BMU 2012; BMU und BDI 2012):

- ▶ Vermeidung schädlicher Emissionen und Schadstoffeinträge in alle Umweltmedien;
- ▶ Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft und Schließung von Stoffkreisläufen; Vermeidung, Wiederverwertung und umweltverträgliche Beseitigung von Abfällen;
- ▶ Reduktion des Einsatzes nicht erneuerbarer Ressourcen;
- ▶ Effizientere Nutzung von Energie, Rohstoffen und anderen natürlichen Ressourcen;
- ▶ Substitution nicht erneuerbarer Ressourcen durch nachhaltig erzeugte erneuerbare Ressourcen;
- ▶ (langfristiges) Erreichen einer auf erneuerbaren Energien basierende Energieversorgung;
- ▶ Erhaltung und Wiederherstellung der biologischen Vielfalt und von Ökosystemen sowie ihrer Leistungen.

Die Relevanz für das Projekt DelphiNE ergibt sich in mehrerlei Hinsicht. So erfordern beispielsweise Aspekte wie die Vermeidung schädlicher Emissionen und Schadstoffeinträge und die Vermeidung oder Wiederverwertung von Abfällen eine kontinuierliche Verbesserung der Prozess und Abläufe in der NE-Metallindustrie. Durch die zunehmende Nutzung erneuerbarer Energien sind ferner zukünftig vermehrt Nachfrageimpulse nach einzelnen NE-Metallen abzusehen. Insgesamt muss sich die NE-Metallindustrie als bedeutender Verbraucher von energetischen und mineralischen Ressourcen einer Vielzahl von Anforderungen stellen, die sich im Laufe des Weges hin zu einer Green Economy ergeben.

1.2 Ziele und Vorgehen

Vor diesem Hintergrund zielt das Projekt darauf ab, eine Diskussion zur Rolle der NE-Metallindustrie in einer Green Economy zu initiieren und dabei mögliche Bausteine einer entsprechenden Entwicklung und deren Hemmnisse herauszuarbeiten. Um eine solche Diskussion auf eine sachlich fundierte und methodisch gesicherte Grundlage zu stellen, bieten sich ausdrücklich Methoden der Zukunftsforschung (z.B. Cuhls 2008; VDI 2010) und hierbei insbesondere das bewährte Instrument der Delphi-Befragung an (z.B. Möhrle und Isenmann 2017; Häder 2009). Die Bestimmung der langfristigen Ressourcenschonungspotenziale in der NE-Metallindustrie hat eine hohe strategische Bedeutung. Die Delphi-Befragung ist das beste verfügbare Mittel, um langfristig wirksame Entwicklungen aus gesamtwirtschaftlicher Sicht erkennen und für die Bestimmung der technologischen Position der Akteure heranziehen zu können.

Dabei werden sowohl Prozess- und Produktinnovationen als auch organisatorische, strukturelle und institutionelle Innovationen berücksichtigt. Die Strukturierung des Vorgehens erfolgt anhand der Betrachtung von Technologiekomplexen. Hierbei werden nicht allein die einzelnen Maßnahmen bzw. Technologien betrachtet. Stattdessen werden Technologien stets mitsamt ihrem technologischen Umystem betrachtet, das heißt inklusive relevanter vor- und nachgelagerter Prozesse sowie Randbedingungen. Die Analysen beziehen sich dabei auf den Zeitraum bis zum Jahr 2030. Der geographische Fokus liegt auf Deutschland, wobei auch internationale Impulse berücksichtigt werden, soweit sich Implikationen für Deutschland ergeben. Inhaltlich wird auf die vier Massenmetalle Aluminium, Kupfer, Blei und Zink fokussiert. Metalle, die deren Behandlung beeinflussen (bspw. Gold/Edelmetalle in der

Kupferrückgewinnung), werden soweit erforderlich mitbetrachtet. Gleichzeitig besitzt die NE-Metallindustrie als großer Stromverbraucher auch das Potenzial mittels Lastmanagement zu einer Stabilisierung der regenerativen Stromversorgung in Deutschland beizutragen.

Die Delphi-Befragung, so wie sie hier ausgeführt ist, ist darauf ausgerichtet, mögliche Ressourcenschonungspotenziale bzw. Maßnahmen mit einem potentiellen Beitrag zur Ressourcenschonung zu identifizieren. Diese Maßnahmen werden im Fortgang bezüglich ihres Potenzials (Höhe des potentiellen Beitrags zur Erreichung der Ziele der Green Economy) und ihrer zeitlichen Realisierbarkeit bewertet. Den Ausgangspunkt bildet eine Analyse der Ist-Situation. Hierbei wird auf Basis einer bibliometrischen Analyse und der Betrachtung laufender Forschungsvorhaben der Stand der Wissenschaft erfasst. Zusätzlich erfolgt eine Workshop-basierte Einbindung von Experten aus Industrie und Wissenschaft um Innovationsmaßnahmen und Trends zu identifizieren. Auf dieser Basis erfolgt die Entwicklung des Fragebogens für die Delphi-Befragung.

Thematisch deckt die Delphi-Befragung die Inhalte ab, so wie sie methodisch gestützt durch den Technologiekomplex beschrieben und abgegrenzt wurden. Als Besonderheit werden neben den für Delphi-Befragungen typischen technologischen Aspekten zusätzlich auch organisatorisch-konzeptionelle Ansatzpunkte hervorgehoben und durch ein Fragenset berücksichtigt. Als unmittelbares und direktes Ergebnis der Delphi-Befragung wird Output erzeugt: Die Ergebnisse der Befragungsrunden liefern einen antwortenfokussierten Lösungsvorschlag zu den Ressourcenschonungspotenzialen in der NE-Metallindustrie, mit Details zur Höhe der Potenziale sowie der dazugehörigen zeitlichen Realisierbarkeit.

Dieser Output wird eingespeist und methodisch verknüpft mit einem Zukunftsworkshop. Im Zukunftsworkshop werden die Ergebnisse der zwei Befragungsrunden den teilnehmenden Experten vorgestellt, und es werden die Befunde diskutiert. Beim Zukunftsworkshop entsteht neben dem Output zudem ein mittelbares und indirektes Ergebnis der Delphi-Befragung: Es wird ein Outcome erzeugt. Der Outcome entsteht im Austausch mit den Experten, wobei ein deutungsfokussierter Lösungsvorschlag zu den Ressourcenschonungspotenzialen in der NE-Metallindustrie produziert wird. Der Outcome enthält z.B. eine Interpretation überraschender Erkenntnisse aus dem antwortenfokussiertem Lösungsvorschlag, und es lassen sich erste Empfehlungen für Maßnahmen(-pakete) formulieren.

Die methodische Verknüpfung zwischen Delphi-Befragung sowie Zukunftsworkshop und dem anschließenden Szenarienworkshop ist forschungsmethodisch bedeutsam und besonders geschickt: Jedes spezifische Instrument aus den Methoden der Zukunftsforschung – mit Delphi, Szenarien und Roadmaps als Kern – adressiert schwerpunktmäßig eine Relevanzdimension:

- ▶ Delphi-Befragung: Trendidentifikation von Ressourcenschonungspotenzialen
- ▶ Zukunftsworkshop: Priorisierung von Ressourcenschonungsmaßnahmen
- ▶ Szenarioworkshop: Beschreibung von Rahmenbedingungen und Bewertung

2 Analyse derzeitiger Entwicklungen

Ziel der Analyse derzeitiger Entwicklungen ist es, einen Überblick über die aktuelle Praxis der Herstellung und Verarbeitung der betrachteten NE-Metalle, über Forschungstrends (u.a. aktuelle und geplante Forschungsarbeiten) und sonstige Ansätze zur Ressourcenschonung in der NE-Metallbranche zu geben. Die Analyse stellt die inhaltliche Vorarbeit zur Erstellung des Fragebogens zur Delphi-Befragung dar. Gleichzeitig dient die Analyse der Identifizierung potentiell relevanter Akteure zur Befragung im Rahmen der Delphi-Befragung.

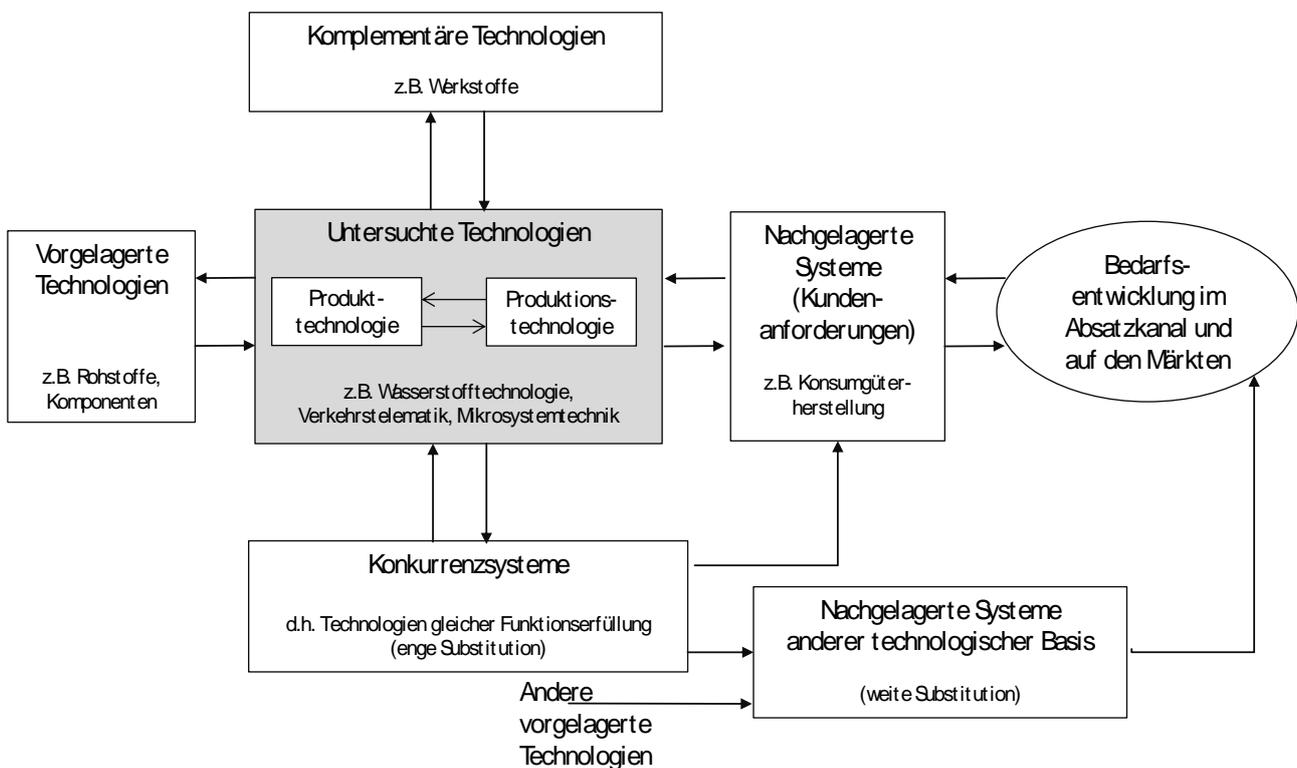
Zur Strukturierung der Analyse wird ein Vorgehen anhand von Technologiekomplexen gewählt, welches in Abschnitt 2.1 beschrieben wird. Anhand der Technologiekomplexe der vier Metalle wird die Ist-Situation (aktuelle Praxis der Herstellung und Verarbeitung, bestehende Forschungstrends sowie sonstige Ansätze zur Ressourcenschonung) untersucht, parallel hierzu werden relevante Akteure identifiziert.

Die Ergebnisse der Bestandsaufnahme werden anschließend zu Thesen verdichtet, die die Grundlage für die Erstellung des Fragebogens für die Delphi-Befragung darstellen. Die parallel erarbeitete Akteursliste stellt den Grundstock der zu Befragenden dar.

2.1 Vorgehen nach Technologiekomplexen

Eine Technologie eines Produkts oder Systems steht immer in einem technologischen Umsystem. Neben der Technologie selbst treten hier Elemente der Herstellung, der störungsfreien Funktionsweise und der Erfüllung des ökonomischen Zwecks auf (vgl. Geschka et al. 2008). Zur Abgrenzung und Beschreibung von Technologien als Untersuchungsgegenstand in der technologischen Vorausschau schlagen Geschka et al. (2008) ein Vorgehen anhand von Technologiekomplexen vor, hierbei wird das gesamte Umfeld einer Technologie entsprechend Abbildung 2 betrachtet.

Abbildung 2: Technologiekomplex zur Kennzeichnung des Umfelds einer untersuchten Technologie

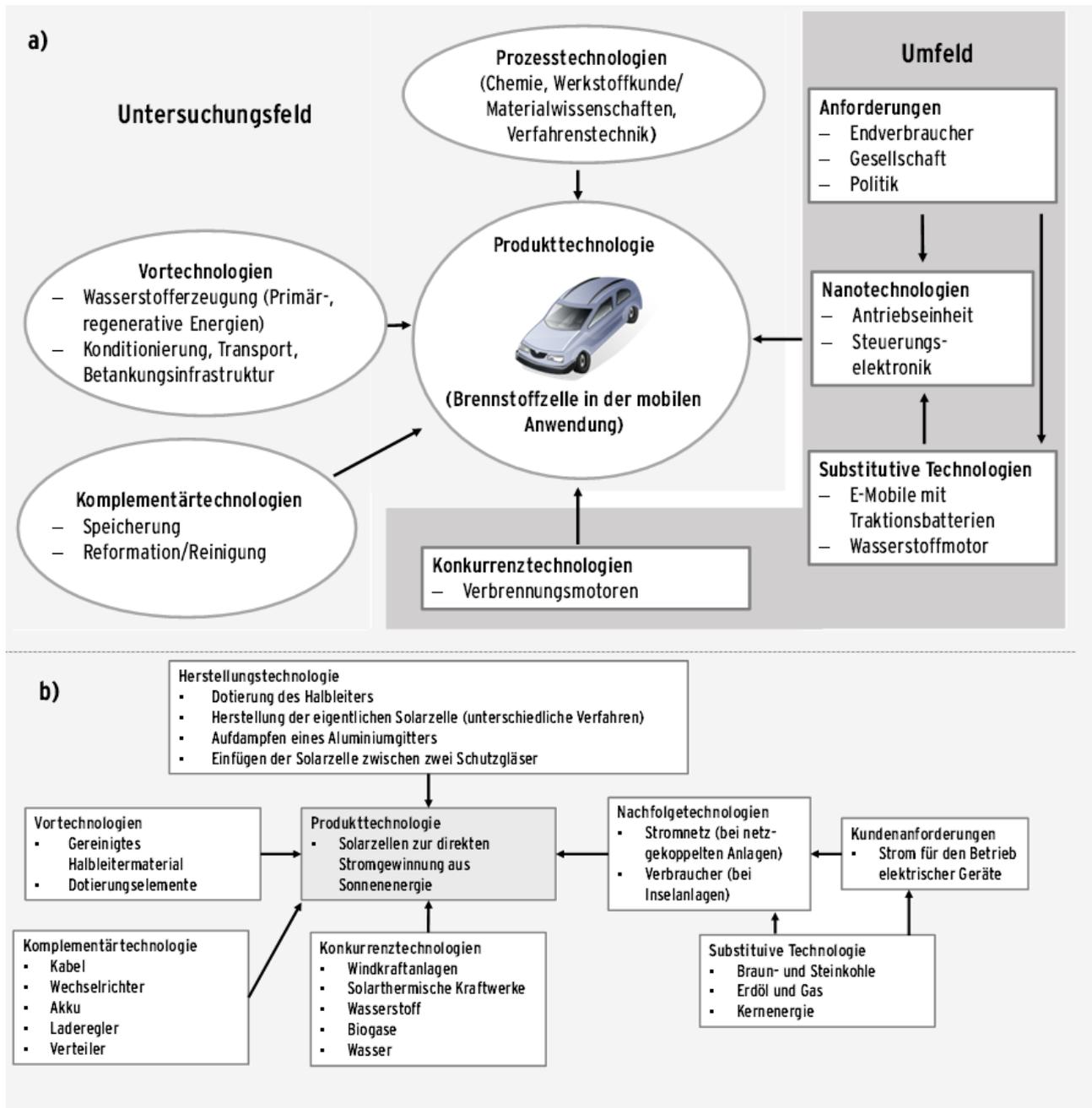


Quelle: nach Geschka et al. 2008

- ▶ Vorgelagerte Technologien sind solche, die in das Produkt eingehen, so z.B. Technologien zur Gewinnung von Rohstoffen.
- ▶ Komplementäre Technologien kommen gemeinsam mit dem untersuchten Produkt zur Anwendung. Aus den nachgelagerten Systemen ergeben sich Anforderungen, die das untersuchte Produkt erfüllen muss.
- ▶ Substitutive Systeme (enge und weite Substitution) erfüllen einen Bedarf durch einen anderen technologischen Problemlösungsansatz (Geschka et al. 2008).

Zwei Beispiele für Technologiekomplexe zur Abgrenzung eines Untersuchungsfeldes aus der Fachliteratur veranschaulichen dies in Abbildung 3.

Abbildung 3: Technologiekomplex-Beispiele



Beispiele nach Geschka et al. 2008; a) Brennstoffzelle b) Photovoltaikzelle

Zur Strukturierung der Ist-Analyse bezüglich der aktuellen Praxis der Herstellung und Verarbeitung der betrachteten NE-Metalle, der laufenden und geplanten Forschungsvorhaben sowie sonstiger Ansätze zur Ressourcenschonung in der NE-Metallindustrie wird in Anlehnung an die Methode zur Abgrenzung von Technologiefeldern anhand von Technologiekomplexen vorgegangen. Da hier im Gegensatz zu den aufgeführten Beispielen (Abbildung 3) nicht eine Technologie, sondern (NE-) Metalle den Untersuchungsgegenstand darstellen und das Ziel zunächst eine Betrachtung der Ist-Situation (bzw. von laufenden und geplanten Forschungsvorhaben anstelle einer Technologievorausschau) ist, sind geringfügige Anpassungen notwendig. Die Detailbetrachtung der einzelnen Elemente ist in separaten

Abschnitten erläutert (Abschnitt 2.2 und folgende). Eine zusammenfassende Darstellung findet sich in Abbildung 4.

Im Zentrum der Technologiekomplexe stehen als „untersuchte Technologie“ die Prozessketten zur Herstellung und Verarbeitung (bis zu Erstellung von Halbzeugen sowie auf der Entsorgungsseite die Prozesse zur Materialrückgewinnung¹) der vier Fokusmetalle (Aluminium, Blei, Kupfer und Zink) (Abschnitt 2.2).

Für diese vier Fokusmetalle werden im Anschluss durch verschiedene methodische Herangehensweisen bestehende Forschungstrends und Potenziale zur Ressourcenschonung identifiziert:

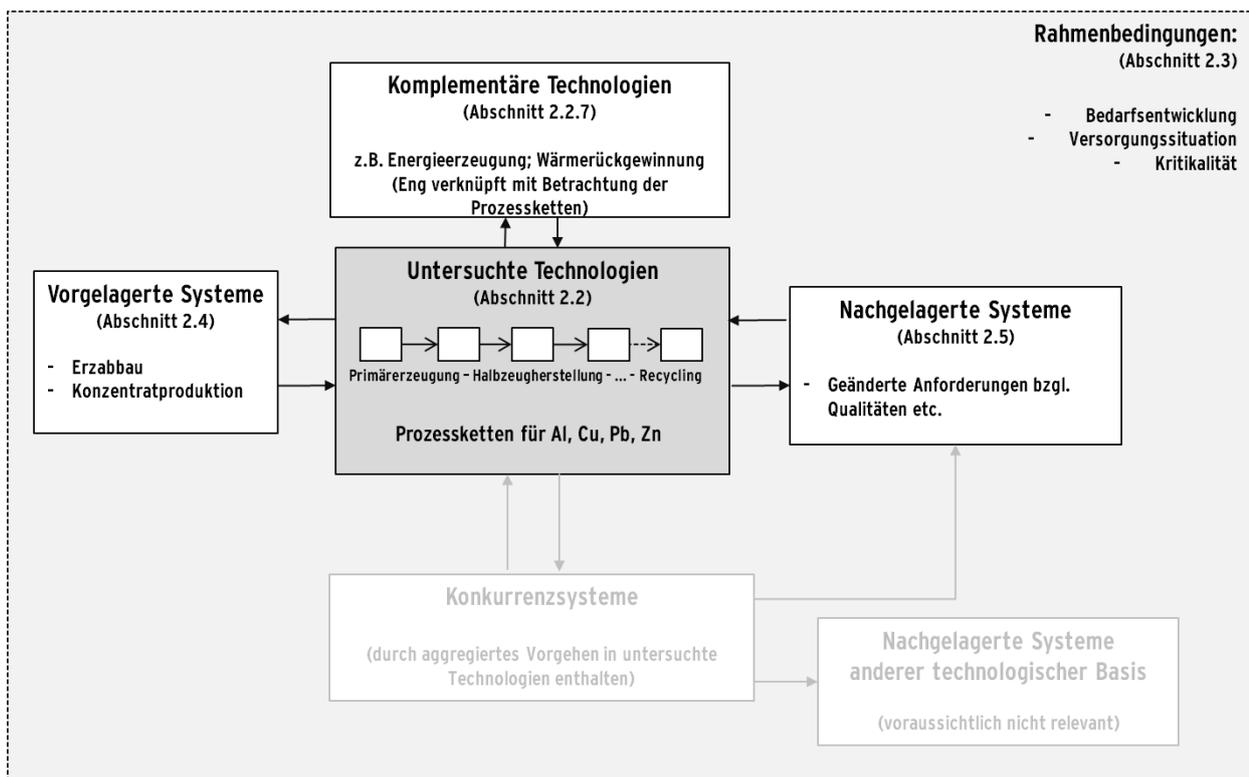
- ▶ Die wissenschaftliche Datenbank „Web of Knowledge“ wird anhand bibliometrischer Methoden durchsucht (Abschnitt 2.2.5). Hierbei werden potenziell relevante wissenschaftliche Veröffentlichungen identifiziert und anhand eines Screenings auf relevante Schlagwörter analysiert. Hierdurch wird ein Einblick in die Themen entsprechender wissenschaftlicher Veröffentlichungen im Zeitverlauf gewonnen.
- ▶ An die Literaturdatenbanksuche schließt sich eine erweiterte Suche nach Ressourcenschonungspotenzialen entlang der Prozesskette an. Hier werden ausgewählte Artikel und Forschungsprojekte (bspw. Review-Artikel, Projektberichte), die einen engen Bezug zu den Projektinhalten aufweisen, genauer betrachtet (Abschnitt 2.2.6), wobei hierbei auch sogenannte graue Literatur (Forschungsberichte, Veröffentlichungen von Verbänden etc.) berücksichtigt wird.
- ▶ Anhand einer gesonderten Betrachtung von komplementären Technologien, also von Technologien, die gemeinsam mit den untersuchten Technologien (den Prozessketten), zum Einsatz kommen, werden Ressourcenschonungspotenziale in die Betrachtung einbezogen, die sich nicht direkt auf die Prozesse zur Herstellung und Verarbeitung der Fokusmetalle beziehen. Unter die komplementären Technologien fallen in diesem Zusammenhang beispielsweise Technologien zur Wärmerückgewinnung oder zur regenerativen Energieerzeugung. Da eine einfache Abgrenzung zur Betrachtung der Prozessketten hier jedoch nur schwer vorzunehmen ist, werden die komplementären Technologien als Unterpunkt (Abschnitt 2.2.5) des Abschnitts 2.2 betrachtet.
- ▶ Bezüglich der Prozessketten und der komplementären Technologien werden zudem anhand einer Datenbanksuche laufende und in den letzten Jahren abgeschlossene Forschungsprojekte identifiziert und auf ihre Forschungsinhalte ausgewertet (Abschnitt 2.2.8).

Konkurrenzsysteme, als nächstes Element der Technologiekomplexe, bezeichnen Systeme, die dieselbe Funktion bereitstellen; in den aufgeführten Beispielen wäre dies bei der Brennstoffzelle ein Verbrennungsmotor, bei Photovoltaikzellen beispielsweise eine Windkraftanlage. Bei der Betrachtung der Fokusmetalle bzw. deren Herstellung und Verarbeitung würden alternative Herstellungsverfahren zu den Konkurrenzsystemen zählen. Soweit diese relevant sind, werden sie aber bereits durch die Bestandsaufnahme zu den Prozessketten abgedeckt. Der Punkt Konkurrenzsysteme muss daher nicht gesondert betrachtet werden, dasselbe gilt für den Punkt nachgelagerte Systeme anderer technologischer Basis.

¹ Andere Aspekte der Entsorgung (Sammlung, Sortierung etc.) werden bereits in anderen UBA-Projekten (u.a. ReStra, Repro) näher betrachtet und führen unseres Erachtens zu weit weg von der eigentlichen Fragestellung nach Ressourcenschonungspotenzialen in der NE-Metallindustrie.

Bezüglich der vor- und nachgelagerten Systeme wird eine zusätzliche Unterscheidung vorgenommen. Unter die Aspekte vor- und nachgelagerte Systeme werden nur Aspekte mit einem direkten technologischen Bezug gefasst. Unter die vorgelagerten Systeme (Abschnitt 2.4) fallen entsprechend Erzabbau und Konzentraterzeugung bzw. die zum Abbau und zur Aufkonzentrierung eingesetzten Technologien. Für diese ergibt sich im Projektkontext jedoch nur eine eingeschränkte Relevanz, da diese nicht in Deutschland zu finden sind. Zu den nachgelagerten Systemen (Abschnitt 2.5) zählen Änderungen von Marktanforderungen, aus denen sich Konsequenzen für die Prozesse der Metallgewinnung und Verarbeitung ergeben, wie beispielsweise Forderungen nach höheren Reinheiten der Metalle. Daneben werden Aspekte wie Preisentwicklungen, Entwicklungen der Versorgungssituation (Preisentwicklung, absolute Entwicklung der Primärerzeugung), institutionelle Entwicklungen, absehbare globale Nachfrage-trends sowie Bedarfsentwicklungen in Deutschland unter dem Punkt Rahmenbedingungen zusammengefasst (Abschnitt 2.3). Insbesondere wird hierbei untersucht, inwieweit sich durch einen Umbau zur Green-Economy (bspw. durch Technologien wie Windkraft oder Elektromobilität) zusätzliche Nachfrageimpulse nach NE-Metallen ergeben können, die sich auf die Ressourcenschonung auswirken könnten.

Abbildung 4: Technologiekomplexe der vier Fokusmetalle - Struktur und zentrale Elemente



2.2 Untersuchte Technologien: Prozessketten in Deutschland

Im Folgenden werden die Prozessketten zur Metallgewinnung und -verarbeitung bis zur Halbzeugherstellung sowie zur Materialrückgewinnung betrachtet. In diesem Zusammenhang wird auch auf komplementäre Technologien, d.h. Produktionsinfrastruktur eingegangen. Unter einem weiteren Punkt „Umweltaspekte“ werden – soweit der Literatur zu entnehmen – die relevantesten Umweltwirkungen sowie Energieverbräuche der Verfahren aufgenommen.

Dieses Vorgehen dient zum einen der Bestandsaufnahme bezüglich der Ist-Situation, zum anderen dienen die aufgestellten Prozessketten (inklusive der Erkenntnisse der Betrachtung komplementärer

Technologien) anschließend als Gerüst zur Durchführung einer bibliometrischen Analyse. Mit dieser können anhand der Analyse von einschlägigen Veröffentlichungen im Zeitverlauf Forschungs- und Entwicklungstrends identifiziert werden. Parallel hierzu werden durch die Auswertung von Datenbanken und einschlägigen Förderprogrammen geplante und laufende Forschungsvorhaben identifiziert, die zum einen häufig Probleme der aktuellen Situation aufgreifen, zum anderen Aussagen über Trends noch weiter in die Zukunft ermöglichen als dies auf Grundlage der Betrachtung von bereits veröffentlichten Arbeiten möglich ist.

2.2.1 Aluminium

Aluminium ist nach Eisen das am zweithäufigsten vom Menschen verwendete Metall (Emsley 2011) sowie das in der Erdkruste am zweithäufigsten vorkommende Metall. Das wesentliche Rohmaterial zur Herstellung von Aluminium ist Bauxit, das in Bauxitminen abgebaut und anschließend in mehreren Schritten zu Aluminium und weiter zu Halbzeugen und den finalen Produkten weiterverarbeitet wird². In Deutschland findet kein Abbau von Bauxit statt. Die Bauxitgewinnung ist zu über 85 % auf Australien, Brasilien, China, Indonesien, Indien und Guinea konzentriert (USGS 2013). Nach Deutschland erfolgt sowohl die Einfuhr von Bauxit als auch von Aluminiumoxid und weiterverarbeiteten Zwischenprodukten wie Hüttenaluminium und Halbzeugen (siehe Tabelle 9; WMV 2001-2013).

Tabelle 9: Produktion, Ein- und Ausfuhr von Aluminiumprodukten

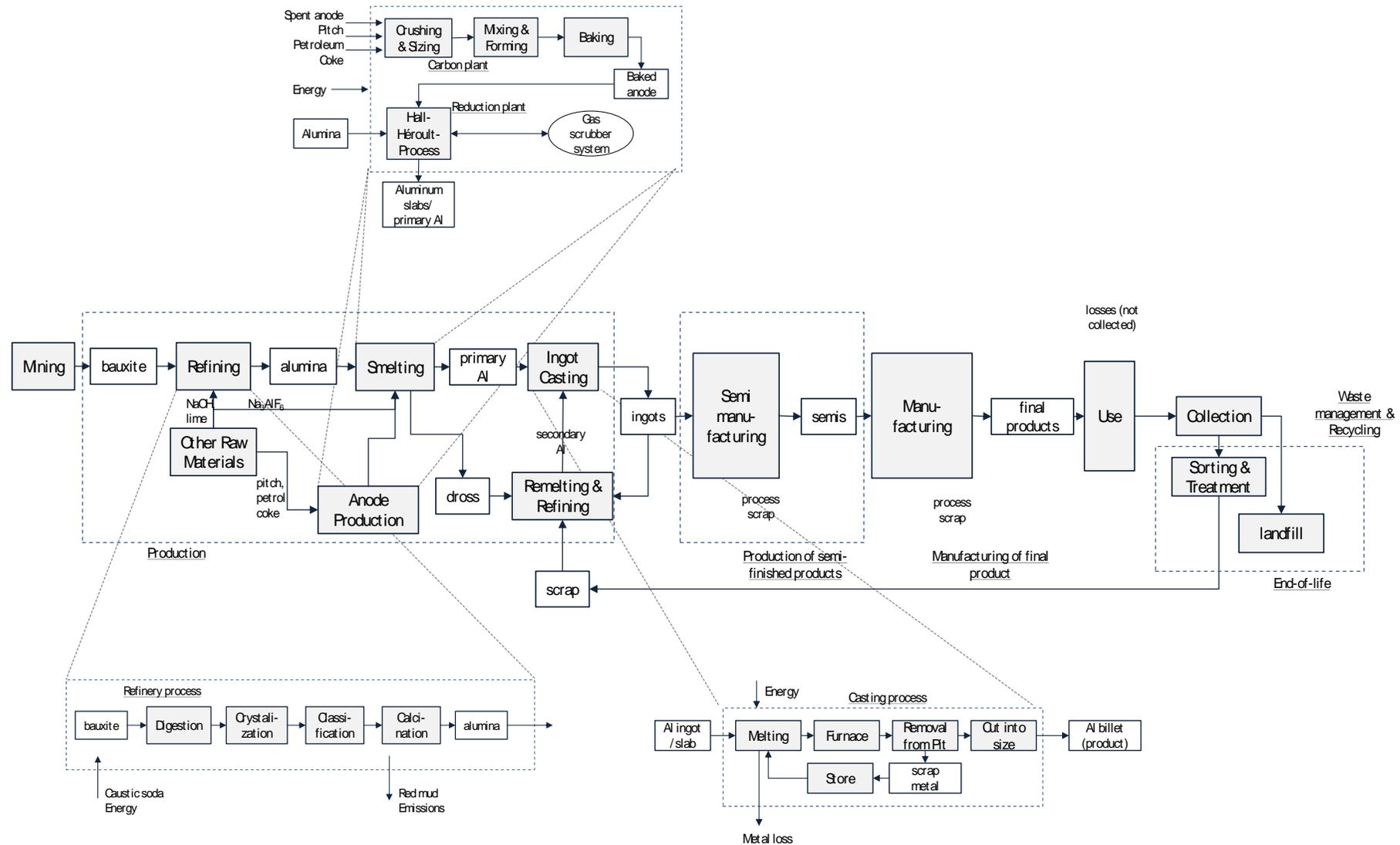
Schritt	Produkt	2009	2010	2011	2012
Einfuhren nach D	Bauxit	2.069	2.005	2.437	2.777
	Sekundärrohstoffe	359	479	653	656
	Hütten-Al, nicht legiert	486	800	771	732
	Hütten-Al, legiert	671	970	1.160	1.134
	Sekundär-Al, legiert	484	622	652	617
	Al- Halbzeuge	920	1.244	1.439	1.310
Produktion in D	aus Erz/ Hüttenaluminium	292	402	432	410
	Sekundär-Al	561	611	634	635
	Al-Halbzeuge	2.019	2.455	2.443	2.411
	Al-Gussteile	558	810	844	803
Ausfuhr aus D	Al-Sekundärrohstoffe	752	824	954	968
	Hütten-Al, nicht legiert	69	112	84	43
	Hütten-Al, legiert	115	171	163	132
	Sekundär-Al, legiert	170	190	252	230
	Al-Halbzeuge	1.123	1.435	1.535	1.489

Quelle: WVM 2001-2013; alle Angaben in [kt=Gg]

² Aus 100 t Bauxit werden 40 bis 50 t Aluminiumoxid gewonnen, die anschließend zu 20 bis 25t Aluminium weiterverarbeitet werden (JRC 2013).

Durch die Importe von Bauxit und die folgende Weiterverarbeitung zu Aluminium hat Deutschland an der weltweiten Aluminiumerzeugung einen Anteil von rund einem Prozent (USGS 2013). Abgesehen vom Bauxitabbau lässt sich in Deutschland entsprechend die gesamte Prozesskette zur Herstellung und Weiterverarbeitung von Aluminium wiederfinden. Die Prozesskette der Aluminiumherstellung ist in Abbildung 5 dargestellt.

Abbildung 5: Prozesskette der Aluminiumherstellung und -verarbeitung in Deutschland



Quellen: eigene Abbildung; basierend auf EAA 2013; Liu und Müller 2012; Progress-Aluminium 2012; Leroy 2009; Tan und Khoo 2005; Hydro o.J.

Den ersten Schritt der Prozesskette stellt mit der Raffination (refining) die Gewinnung von Alumina (Aluminiumoxid, Tonerde) aus Bauxit dar. Dies geschieht im Wesentlichen durch den etablierten Bayer-Prozess (siehe bspw. Liu und Müller 2012; Leroy 2009). Neben Bauxit wird in diesem Schritt Natriumhydroxid (NaOH) und Kalk (EAA 2013; Leroy 2009) benötigt. Zunächst wird aus dem Bauxit bei Temperaturen zwischen 100 und 350°C Aluminiumhydroxid gewonnen, das im Folgenden bei etwa 1.100°C kalziniert wird. Das Endprodukt der Raffination ist Aluminiumoxid (Al_2O_3), das als feinkörniges weißes Pulver vorliegt (Leroy 2009). Hierbei fällt sogenannter Rotschlamm an, ein Gemisch, das neben Natronlauge u.a. Eisen-, Aluminium- und Titanoxide, Silikate, Kieselsäureverbindungen und Schwermetalle enthält, und dessen weitere Behandlung im Einzelnen von verschiedenen Eigenschaften wie Feuchtigkeitsgehalt, Rheologie/ Fließverhalten, Partikelbeschaffenheit und -oberflächen-größe, Mineralogie, Gehalt an Edelmetallen sowie Seltenen Erdmetallen, und Gehalt an toxischen Substanzen (vgl. Paramguru et al. 2004; Brunori et al. 2005; Liu et al. 2009) abhängt. Häufig sind weniger eventuell enthaltene toxische Stoffe als vielmehr die enthaltene Natronlauge und die entstehenden absoluten Mengen als problematisch anzusehen (Paramguru et al. 2004; Brunori et al. 2005). Zur Neutralisierung des Rotschlammes existieren verschiedene Verfahren (Paramguru et al. 2004; Brunori et al. 2005). Typischerweise wird Rotschlamm in abgedichteten Deponien eingelagert, wobei auch verschiedene Verfahren zur Aufbereitung und Weiterverwendung untersucht werden (Paramguru et al. 2004; Brunori et al. 2005; Liu et al. 2009; WVM 2013).

Die Aluminiumoxidproduktion ist gleichzeitig die wichtigste (weil rentabelste) Quelle zur Gewinnung von Gallium. Etwa 90 % des weltweit produzierten Galliums werden unter Anwendung verschiedener Verfahren als Ko-Produkt der Aluminiumherstellung gewonnen. Deutschland gehört dabei zu den größten Galliumproduzenten weltweit (Zhao et al. 2012; Ritthoff 2011).

Im nächsten Schritt, der Verhüttung, wird aus Alumina in einem elektrolytischen Prozess, dem Hall-Héroult Prozess, Aluminium gewonnen. Aus 1.920 bis 1.925 kg Al_2O_3 werden 1.000 kg Aluminium erzeugt. Weitere Rohmaterialien stellen hier Aluminiumfluorid (Na_3AlF_6) und die Kohlenstoff (Graphit)-Anode dar. Am gängigsten ist das sog. pre-baked Verfahren mit vorgefertigter, fester Anode. Ein alternatives Verfahren von geringerer Relevanz ist das Söderberg oder „self-baking“ Verfahren, das in Europa in 2010 jedoch nur noch einen Anteil von 5 % an der Aluminiumherstellung hatte mit weiter sinkender Tendenz (EAA 2013; Leroy 2009). Statt einer Kohlenstoffanode kommt hier eine Kohlenstoffpaste zum Einsatz. Die in der Elektrolyse erzeugte Aluminiumschmelze wird im Folgenden in Abhängigkeit der Anforderungen an das Produkt legiert ggf. mit sekundärem Aluminium vermischt und zu Ingots (Barren) gegossen. Der Anwendung von inertem Anodenmaterial wird ebenfalls ein großes Potenzial zur Reduktion von THG Emissionen und Energieverbrauch zugesprochen, diverse Materialien werden hierzu erforscht (siehe hierzu auch Abschnitt 2.2.6). In industriellem Maßstab sind inerte Anoden jedoch noch nicht in Einsatz, wobei in einem Vorhaben in Russland inerte Anoden in ersten Pilotanlagen erprobt werden (RUSAL 2013).

Die Material und Energieverbräuche sowie Emissionen von Raffination, Elektrolyse sowie Herstellung der Kohlenstoffanode sind für Europa vergleichsweise gut dokumentiert. Die relevanten Inputs und Outputs dieser Schritte sind für verschiedene Jahre in Anhang A aufgeführt.

Halbzeugherstellung

Die wesentlichen Prozesse zur Weiterverarbeitung der Ingots in der anschließenden Halbzeugherstellung sind Walzen und Extrusion (Liu und Müller 2012; Leroy 2009). Die resultierenden Halbzeuge bzw. Zwischenprodukten sind beispielsweise Bleche, Folien und Profile, die später zu End-Produkten wie Fenster-Rahmen, Fahrradrahmen, Autokomponenten etc. weiterverarbeitet werden (Liu und Müller 2012; Leroy 2009).

Anwendungen / Endprodukte

Die Verteilung auf die verschiedenen Anwendungsgebiete ist in Tabelle 10 dargestellt. Der Verwendung im Fahrzeugbau kommt mit rund 40 % die größte Bedeutung zu, gefolgt von Bauwesen und Verpackungen.

Tabelle 10: Aluminiumanwendungen in Deutschland

Sektor	2009	2010	2011	2012
Verkehr (Fahrzeuge)	37,47%	42,00%	43,53%	43,51%
Bauwesen	18,00%	15,01%	14,03%	14,01%
Verpackung	12,01%	12,02%	12,03%	11,99%
Maschinenbau	9,00%	9,00%	8,96%	8,99%
Elektrotechnik	8,01%	8,51%	8,53%	8,49%
Eisen- und Stahlindustrie	5,99%	5,98%	5,97%	6,01%
Haushaltswaren	4,52%	3,50%	2,99%	3,01%
Sonstige	4,96%	3,99%	3,95%	4,00%

Quelle: WVM 2001-2013

Recycling

EOL-Aluminiumschrott kommt über ein breit-gefächertes Netzwerk von Schrotthändlern und Entsorgungsunternehmen ins Recycling. Im bedeutendsten Anwendungsgebiet, Fahrzeuge, sind vergleichsweise hohe Verluste in der Sammlung festzustellen. Zwischen 60 und 88 % der gelöschten Fahrzeuge werden nicht in Deutschland recycelt (Umweltbundesamt 2010; Hagelücken 2010; Hagelücken 2007; Hagelücken et al. 2005). Davon abgesehen erfolgen Sammlung und Recycling auf hohem Niveau. So liegen beispielsweise im Bereich der Verpackungen die Sammelquoten bei etwa 88 % (Hydro 2013).

Anschließend an die Sammlung erfolgen über verschiedene Verfahren in mehreren Schritten eine Abtrennung des Aluminiums vom sonstigen Abfall sowie eine Aufbereitung, die von Art und Größe des Abfalls abhängt. In der Regel werden Aluminiumschrotte in Abhängigkeit von ihrer Legierungszusammensetzung sortiert, um unnötige Vermischungen zu vermeiden (JRC 2013). Bei den sog. Refinern erfolgt schließlich das eigentliche Recycling. Je nach Qualität kann der Schrott entweder direkt umgeschmolzen werden oder es ist ein zusätzlicher Raffinationsschritt nötig, um Verunreinigungen zu reduzieren (vgl. Hydro 2011).

Neben Aluminiumschrott aus Endprodukten fällt in den Schritten zur Halbzeug- und Produktfertigung Schrott an (=pre-consumer scrap), der in der Regel aufgrund der bekannten Qualität und Legierung mit wenig Aufbereitung ein- bzw. umgeschmolzen werden kann. Falls die zu recycelnden Schrotte beschichtet sein sollten, wird zunächst eine Entfernung dieser Beschichtung erforderlich (Leroy 2009).

Die Sekundärproduktion von Aluminium zeichnet sich durch einen signifikant geringeren Energieverbrauch im Vergleich zur Primärerzeugung aus. Der Energieverbrauch wird auf 5 % im Vergleich zur Primärgewinnung beziffert (WVM 2013; GDA 2013a; Hydro 2013; JRC 2013; GDA 2013; Liu und Müller 2012), was insbesondere im Wegfallen von Abbau und Umwandlung von Bauxit zu Aluminiumoxid begründet liegt (vgl. Abbildung 5).

Umweltaspekte

Wie beschrieben findet sich in Anhang A eine umfangreiche Auflistung der Input und Outputs der verschiedenen Schritte der Prozesskette zur Aluminiumgewinnung und -verarbeitung. Grundsätzlich ergeben sich hohe Umweltbelastungen (und Kosten) insbesondere aus dem hohen Energiebedarf der Prozesskette sowie den THG und SO₂ Emissionen der Elektrolyse (EAA 2013; vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11: Umweltwirkungen der Gewinnung einer Tonne Primäraluminium

Umweltwirkung/ Emission	Menge	Einheit
Treibhauseffekt / CO ₂ -Äquivalente	~10.000-12.000	kg CO _{2e} / t
Versauerung / SO ₂ -Äquivalente	56,3	kg SO _{2e} /t

Quelle: PE 2014: Classen et al. 2009

Im aktuellen Entwurf der EU BVT Merkblätter wird ein Energieverbrauch von 15 kWh pro Kilogramm genannt (JRC 2013), was mit anderen Angaben zum weltweiten Durchschnittsverbrauch übereinstimmt (Hydro o.J.). Als Spannbreite finden sich in der Literatur Werte von 13 bis 18 kWh/kg (Leroy 2009), als europäischer Durchschnitt 14,9 kWh (EAA 2013). Der europäische Durchschnitt liegt damit schon jetzt unter den Empfehlungen für eine beste verfügbare Technik. Dies deutet entweder darauf hin, dass der Diffusionsgrad der BVT in der EU sehr hoch ist, oder dass die Definition der BVT aktualisiert werden müsste. Für das Hydrowerk in Neuss werden bspw. maximal 14 kWh/kg angegeben (Hydro o.J.). Darüber hinaus lassen sich folgende Angaben zu Verbräuchen und Abfällen machen (JRC 2013):

- ▶ Verbräuche (JRC 2013):
 - Bauxit: 2.065-2.275 kg/t
 - NaOH (50%): 30 -70 kg/t
 - CaO: 30 – 80 kg/t
 - Wasser 1.000-5.000 kg/t
 - Energieverbrauch 7,6-11,7 GJ/t
- ▶ Abfälle (JRC 2013):
 - Rotschlamm 600-1.500 kg/t Al₂O₃

2.2.2 Kupfer

In Deutschland findet kein Abbau von Kupfererz mehr statt, ehemals vorhandene Vorkommen sind mittlerweile erschöpft (DERA 2012; Deutsches Kupferinstitut o.J.). Der größte Produzent von Kupfererz ist heute Chile mit rund 32 % Anteil an der Weltproduktion, gefolgt von China und den Vereinigten Staaten mit 8 bis 9 bzw. rund 7 % (USGS 2013). Deutschland ist entsprechend zu 100 % auf Importe angewiesen, welche sich in Kupfererz und -konzentrate, raffiniertes Kupfer sowie Halbzeuge unterscheiden lassen (DERA 2013; WVM 2001-2013). Bzgl. der Importe von Kupfererz und -konzentraten findet zwar keine Unterscheidung in den WVM Statistiken statt (siehe WVM 2001-2013). Der Vergleich mit anderen Quellen (DERA 2013) legt aber nahe, dass es sich hierbei fast ausschließlich um Konzentrate handelt und Roherze nur eine untergeordnete Rolle spielen. Zudem liegen Bergbau und Aufbereitung zu Konzentraten aufgrund der niedrigen Kupfergehalte der Roherze, durch die ein weiterer Transport wenig wirtschaftlich ist, in der Regel räumlich dicht beieinander (WVM 2013; Deutsches

Kupferinstitut 1997). Die Produktion sowie Ein- und Ausfuhr von Kupferprodukten in Deutschland sind in Tabelle 12 dargestellt.

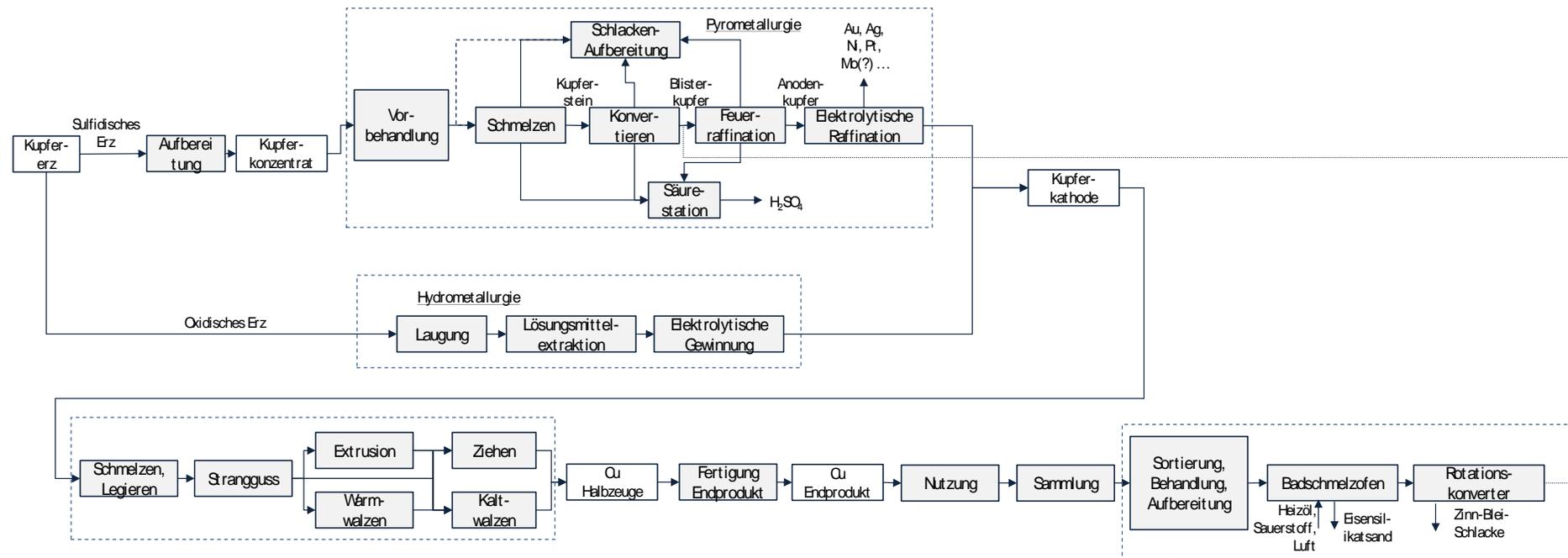
Tabelle 12: Produktion, Ein- und Ausfuhr von Kupferprodukten

Schritt	Produkt	2009	2010	2011	2012
Einfuhren nach D	Cu- Erze und Konzentrate	1.260	1.128	1.136	1.215
	Sekundärrohstoffe	450	626	653	656
	Cu zum Raffinieren	47	23	68	46
	raffiniertes Cu, nicht legiert	655	744	739	703
	raffiniertes Cu, legiert	38	36	36	37
	Cu-Halbzeuge	212	257	296	283
Produktion in D	Cu aus Erz (primären Vorstoffen)	330	402	709	682
	Cu aus sekundären Vorstoffen	339	302		
	Cu-Gusslegierungen	32	35	35	35
	Cu Halbzeuge (davon Leitmaterial)	1.352 (639)	1.655 (725)	1.631 (82)	1.500 (651)
Ausfuhren aus D	Cu-Sekundärrohstoffe	445	578	589	588
	raffiniertes Cu, nicht legiert	69	112	201	277
	raffiniertes Cu, legiert	10	13	12	15
	Cu-Halbzeuge	780	929	961	878

Quelle: WVM 2001-2013; alle Angaben in [kt]

Mit Ausnahme des Erzabbaus ist entsprechend die gesamte Prozesskette der Kupferherstellung und -verarbeitung in Deutschland zu finden. Die Prozesskette ist in Abbildung 6 dargestellt.

Abbildung 6: Prozesskette der Kupferherstellung und -verarbeitung in Deutschland



Quelle: eigene Abbildung; basierend auf Deutsches Kupferinstitut 2012; Metalle pro Klima 2012; Aurubis AG 2012; Classen et al. 2009; Fthenakis et al. 2009; Messner et al. 2005; Norgate 2001

Zu unterscheiden ist zwischen der Verarbeitung von sulfidischen und oxydischen Erzen, für die unterschiedliche Verfahrensrouten zum Einsatz kommen. Konzentrate aus sulfidischen Erzen werden in einer pyrometallurgischen Route weiterverarbeitet, während oxydische Erze hydrometallurgisch verarbeitet werden.

In Deutschland und Europa erfolgt überwiegend die (pyrometallurgische) Verarbeitung von Konzentraten aus sulfidischen Erzen (Gößling-Reisemann et al. 2007). Im aktuellen Draft der EU BVT Merkblätter wird der Anteil der pyrometallurgischen Route auf 85 % beziffert (JRC 2013), was eine geringfügige Steigerung zu 80 % im Jahr 2000 darstellt (Gößling-Reisemann et al. 2007). Weltweit wird der Anteil der pyrometallurgischen Route auf 80 bis 90 % beziffert (European Copper Institute 2013; Ayres et al. 2002).

Pyrometallurgische Route

In der pyrometallurgischen Route schließt sich wie geschildert an den Abbau der sulfidischen Erze im Abbau-land die Aufbereitung zu Konzentraten mit Gehalten zwischen 25 bis 35 %, teilweise auch bis 40 oder 50 % (WVM 2013; Classen et al. 2009; Meier 2006; Deutsches Kupferinstitut 1997). Die Konzentrate werden dann zur weiteren Verarbeitung nach Deutschland importiert.

Das Konzentrat wird bei etwa 700°C geröstet und anschließend aufgeschmolzen. Hierbei entsteht sogenannter Kupferstein. Anschließend wird der enthaltene Schwefel in einem Konverter durch Aufblasen von Sauerstoff verbrannt, wobei sogenannter Blisterkupfer (auch: Konverterkupfer; Schwarzkupfer) entsteht (Angerer et al. 2010; Deutsches Kupferinstitut 2012).

In der anschließenden thermischen Raffination wird der Restsauerstoff entzogen, wobei Anodenkupfer (auch: Garkupfer) mit einer Reinheit von 98,5 % gewonnen wird, die jedoch für viele Anwendungen nicht ausreicht (WVM 2013). Daher schließt sich meist eine elektrolytische Kupferraffination an. Hier wird das Anodenkupfer in eine Kupfersulfatlösung gehängt. Das reine Kupfer scheidet sich dabei an der Kathode ab, während alle unedleren Metallionen wie Eisen-, Zink- und Bleiionen in der Lösung bleiben und später ausgefällt werden (WVM 2013). Im Elektrolyserückstand (anode slime) sammeln sich ferner die Edelmetalle (Gold, Silber, Platin etc.). Dieses Kathodenkupfer mit einer Reinheit von 99,5 % bis 99,995 % geht weiter in die Halbzeugherstellung (Meier 2006).

Hydrometallurgische Route

In der hydrometallurgischen Route werden oxydische Kupfererze meist mit Schwefelsäure behandelt, wobei das Kupfer aus dem Erz herausgelaugt wird. Anschließend wird das gelöste Kupfer durch Extraktionsverfahren aus der Lauge ausgefällt (European Copper Institute 2013; Classen et al. 2009; Deutsches Kupferinstitut 1997). Hieran schließt eine elektrolytische Reduktion an, bei der handelsfähiges Kathodenkupfer gewonnen wird (Angerer et al. 2010).

Zwar ist der Anteil des über die hydrometallurgische Route hergestellten Kupfers weltweit mit 17 % vergleichsweise gering, jedoch ist die Tendenz steigend. Zudem weist die Route einige Vorteile auf (u.a. geringerer Energieaufwand, niedrigere Kosten) (European Copper Institute 2013).

Halbzeugherstellung

An die Gewinnung des Kathodenkupfers schließt sich die Weiterverarbeitung zu Halbzeugen an. Die häufigsten Halbzeuge sind Rohre, Drähte und Bleche (Deutsches Kupferinstitut 2012; JRC 2013). Je nach geforderten Eigenschaften kann Kupfer entsprechend legiert werden. Kupfer kann sehr gut gegossen werden. Daneben kommen häufig umformende Verfahren wie Extrusion, Warmwalzen, Ziehen

und Kaltwalzen zum Einsatz (Deutsches Kupferinstitut 2012/o.J.). Gängige Verfahren in der Drahtherstellung sind der Southwire Prozess, der Contirod Prozess, der Properzi und Secor Prozess, der Upcast und der Dipforming Prozess (siehe detaillierte Beschreibung in JRC 2013). Die Blechherstellung setzt sich typischerweise zusammen aus den Schritten Erwärmen, Warmwalzen, Fräsen, Kaltwalzen, Abkühlen/Härten, Beizen/Spülen/Trocknen, Abkühlen/Härten und Finish (Schneiden auf Länge und Breite) (JRC 2013).

Anwendung / Endprodukte

Die Verteilung auf die verschiedenen Anwendungsgebiete ist in Tabelle 13 dargestellt. Die Statistiken zeigen hier eine konstante Verteilung auf die Anwendungsgebiete in den Jahren 2009 bis 2012. Den größten Anteil hat die Verwendung für Kabel und sonstige Anwendungen in der Elektroindustrie gefolgt von Anwendungen im Bauwesen sowie der Automobilindustrie.

Tabelle 13: Kupferanwendungen in Deutschland

Anwendungsbereich	2009	2010	2011	2012
Kabel / Elektroindustrie	57%	57%	57%	57%
Bauwesen	15%	15%	15%	15%
Automobilindustrie	9%	9%	9%	9%
Maschinenbau	8%	8%	8%	8%
Handel	5%	5%	5%	5%
Sonstige	6%	6%	6%	6%

Quelle: WVM 2001-2013

Recycling

Die Sammlung von EOL-Kupferschrott ist breit gefächert und produktabhängig. Für Elektro- und Elektronikprodukte existieren beispielsweise verschiedene Sammelsysteme, die Sammelquoten schwanken zwischen 25 und 60 % (vgl. Gallenkemper & Breer 2013; Huisman et al. 2007; Hagelüken 2010b; siehe auch Projekt RePro - Weiterentwicklung der abfallwirtschaftlichen Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten am Beispiel von Elektro- und Elektronikgeräten; FKZ 3711 95 318), Für die Sammlung von Automobilen gelten die bereits zu Aluminium beschriebenen Einschränkungen in der Erfassung.

Das eigentliche Recycling ist schließlich ebenfalls produktabhängig. Die prinzipielle Eignung von Kupfer zum Recycling ist hoch. Unedlere Metalle wie bspw. Stahl oder Aluminium können über Oxidation entfernt werden, andere Unreinheiten und Begleitmetalle werden in der Elektrolyse entfernt (Hooek 2008). Je nach Beschaffenheit des metallführenden Produkts bzw. der Reinheit des Schrottes ist jedoch eine mehr oder weniger aufwendige Vorbehandlung und Aufbereitung notwendig (mechanische Vorbehandlung/Shreddern, mechanische Trennung der Fraktionen) (Kawohl 2011).

Die Erzeugung von Sekundärkupfer erfolgt pyrometallurgisch. Als ein repräsentatives Verfahren kann das Kayser Recycling System (KRS) angesehen werden, welches bei Aurubis zum Einsatz kommt (Aurubis AG 2012; Metalle pro Klima 2012; JRC 2013). Das aufbereitete Inputmaterial gelangt hierbei zunächst in den Badschmelzofen, wo Kupfer, Nickel, Zinn und Blei sowie enthaltene Edelmetalle zu einer Legierung von rund 80 % Kupferanteil angereichert werden (Metalle pro Klima 2012). Im nachfolgenden Schritt erfolgt im Rotationskonverter eine weitere Aufkonzentrierung auf 95 % Kupferanteil,

Zinn und Blei werden abgetrennt und in einem angeschlossenen Mischzinnofen zu einer Zinn-Blei-Legierung verarbeitet. Den letzten Schritt stellen wie bei der Primärkupfergewinnung die Feuer- und elektrolytische Raffination dar (Metalle pro Klima 2012). Die genaue Verfahrenskonfiguration hängt von Ausgangsmaterial (Reinheit, Beschaffenheit etc.) ab.

Der Energieaufwand beim Kupferrecycling ist etwa 60 bis 65 % geringer als bei der Primärerzeugung (Hooek 2008; Ayres et al. 2002).

Umweltaspekte

Der in Bezug auf die Umweltwirkungen mit Abstand relevanteste Prozessschritt ist der Abbau des Kupfererzes (siehe Lemken et al. 2008) und liegt somit außerhalb des Betrachtungsraumes des Projektes. Für Abbau und Aufkonzentrierung einer Tonne Kupfer werden etwa 8 bis 28 MWh Energie sowie 200 bis 900 m³ Wasser benötigt und es fallen 100 bis 350 t Abraum sowie 300 kg SO₂-Emissionen an (Lemken et al. 2008). Mit jeder eingesparten Tonne Kupfer in der Produktion in Deutschland werden dementsprechend auch diese umweltbelastenden Stoff- und Energieströme eingespart.

Tendenziell lässt sich hierbei beobachten, dass der Konzentrationsprozess durch abnehmende Erzqualitäten aufwendiger wird und Emissionen zunehmen (Langner 2013). Gleichzeitig gelangen wachsende Schwermetallfrachten und andere toxische Substanzen mit den Konzentraten in die europäischen Anlagen (Langner et al. 2013) (vgl. Abschnitt 2.4).

Durch Verunreinigungen mit Schwermetallen oder anderen toxischen Substanzen kommt der Vermeidung und Verminderung von Staubemissionen in der weiteren Verarbeitung eine besondere Rolle zu. Im Draft der BVT Merkblätter werden Abgase aus diversen Prozessschritten und diffuse Emissionen als wesentliche Umweltprobleme genannt (JRC 2013). Aurubis führt im Umweltreport 2012 neben der Verringerung von Staub- (in 2011 bereits 93 % Reduktion im Vergleich zum Jahr 2000 erreicht) auch die Verminderung von CO₂-Emissionen durch Abwärmenutzung sowie die Verringerung von SO₂-Emissionen (in 2011 bereits 84 % Reduktion im Vergleich zum Jahr 2000 erreicht) als wichtigste Ziele im Konzernumweltschutz an (Aurubis AG 2012a). Aurubis gibt den Energieverbrauch (im Wesentlichen Strom und Erdgas) im Jahr 2011 in Hamburg mit 2,3 MWh/t bzw. in Lünen mit 2,6 MWh/t erzeugten Kupfers an (Aurubis AG 2012).

Giegrich et al. (2007) führen die in Tabelle 14 angegebenen Umweltwirkungen bzw. Emissionen für die Produktion einer Tonne Primärkupfer an. Zu beachten ist, dass diese auch die außerhalb der Systemgrenzen, d.h. außerhalb Deutschland gelegene Prozessschritte wie Abbau und Aufkonzentrierung einschließen.

Tabelle 14: Umweltwirkungen der Gewinnung einer Tonne Primärkupfer

Umweltwirkung/ Emission	Menge	Einheit
Treibhauseffekt / CO ₂ -Äquivalente	2.917	kg CO _{2e} / t
Versauerung / SO ₂ -Äquivalente	477,7	kg SO _{2e} /t
Feinstaub PM 10	57	kg PM10 _e /t
Arsen (in Abgas)	907	g/t
Cadmium (in Abgas)	317	g/t
Quecksilber (in Abgas)	2,0	g/t
Blei (in Abgas)	2.265	g/t

Quelle: Giegrich et al. (2007)

2.2.3 Blei

Die Hälfte des Abbaus von bleihaltigen Erzen findet in China statt, gefolgt von Australien, wo 12 bis 13 % des Abbaus zu finden sind (USGS 2013). Der Abbau erfolgt häufig in Verbindung mit Zink; Blei-Zink-Erze machen etwa 70 % der heutigen Gesamtproduktion der Metalle aus (Classen et al. 2009). In Deutschland ist keine Minenproduktion zu finden, weshalb Deutschland auch bei (primärem) Blei bzw. von Bleierzen und -konzentraten zu 100 % auf Importe angewiesen ist. Ein- und Ausfuhren von Blei bzw. Vorprodukten und Halbzeugen sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Ein- und Ausfuhren von Blei

Schritt	Produkt	2009	2010	2011	2012
Einfuhren nach D	Pb-Erze und Konzentrate	106	184	205	228
	Pb-Sekundärrohstoffe	40	40	36	28
	Pb zum Raffinieren	36	82	72	62
	raffiniertes Pb, nicht legiert	65	70	86	86
	raffiniertes Pb, legiert	4	5	30	31
	Pb-Halbzeuge	3	2	5	6
Ausfuhren aus D	Pb-Sekundärrohstoffe	13	10	14	8
	raffiniertes Pb, nicht legiert	156	155	160	146
	raffiniertes Pb, legiert	40	39	27	22
	Pb-Halbzeuge	32	27	25	20

Quelle: WVM 2001-2013

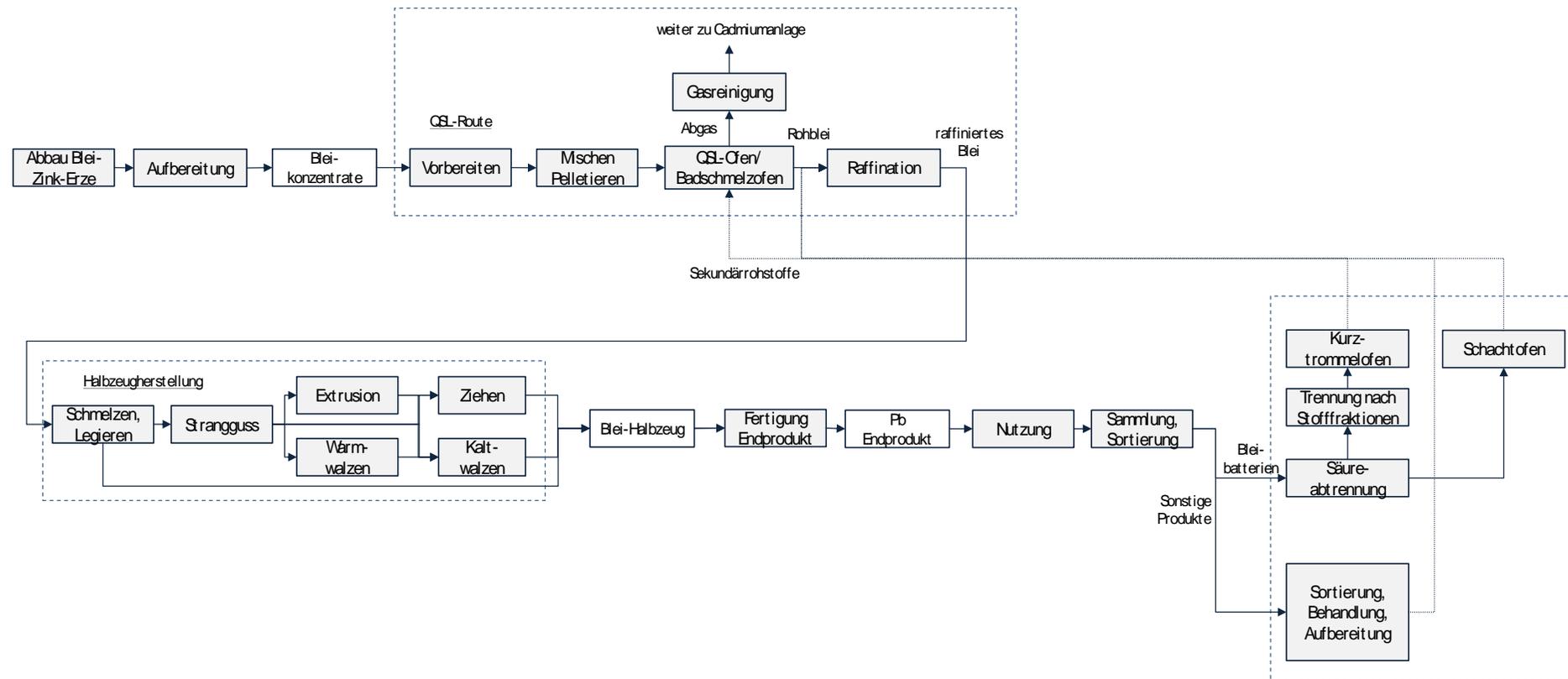
Der häufig gemeinsamen Erzeugung folgend werden auch in den von der WVM veröffentlichten Statistiken Blei und Zinkerzeugung gemeinsam behandelt. Tabelle 16 stellt die Erzeugung und Verarbeitung von Blei- und Zinkprodukten in Deutschland dar.

Tabelle 16: Blei- und Zinkerzeugung und Verarbeitung in Deutschland

Schritt	Produkt	2009	2010	2011	2012
Produktion in D	raffiniertes Pb und Zn aus Erz	244	269	278	273
	raffiniertes Pb und Zn aus Sekundärrohstoffen	300	300	321	320
	Feinzinkgusslegierungen	41	50	53	50
	Umschmelzzink, Zinklegierungen	5	7	6	7
	Pb- und Zn- Halbzeuge	191	195	209	194

Quelle: WVM 2001-2013

Abbildung 7: Prozesskette der Bleiherstellung und -verarbeitung in Deutschland



Quelle: eigene Abbildung basierend auf WVM 2013; Sullivan und Gaines 2012; Varta 2012; Recyclex 2011; Fthenakis et al. 2009; Classen et al. 2009; Bräutigam et al. 2008; MRU o.J.

Abgesehen vom Abbau ist entsprechend auch bei Blei die gesamte Prozesskette der der Erzeugung und Verarbeitung in Deutschland zu finden. Die Prozesskette ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Erzeugung von Blei aus Bleikonzentraten kann in zwei verschiedenen Verfahrensrouten erfolgen, die Sinterröst-Oxidations-Route und Direkteinschmelzverfahren (Classen et al. 2009; WVM 2013). Die gemeinsame Gewinnung mit Zink im Imperial-Smelting-Ofen ist kurz im Abschnitt zur Zinkerzeugung beschrieben, wird jedoch heute aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit mit Ausnahme von Polen in Europa nicht mehr eingesetzt.

Beim Sinterrösten werden die schwefelhaltigen (sulfidischen) Vorstoffe in einem ersten Verfahrensschritt in Bleioxide und gasförmiges Schwefeldioxid überführt (WVM 2013; Classen et al. 2009; Bräutigam et al. 2008). Wie in der Zinkproduktion kann das Schwefeldioxid zu Schwefelsäure weiterverarbeitet werden. Das Bleioxid wird anschließend im Hoch- bzw. Schachtofen zu Blei reduziert. Das hierbei entstehende „Werkblei“ ist noch stark verunreinigt. Im anschließenden Raffinationsprozess wird schließlich Blei mit einer Reinheit von 99,9 % und mehr gewonnen (WVM 2013; Classen et al. 2009). Grundsätzlich stehen zwei verschiedene Raffinationsverfahren zur Verfügung, elektrolytische und pyrometallurgische Raffination, wobei die elektrolytische Raffination kostenintensiver ist und an Bedeutung verliert. In der pyrometallurgischen Raffination werden in mehreren Stufen Verunreinigungen entfernt; hierzu zählen bei der Primärerzeugung in erster Linie Kupfer, Silber, Bismut, Antimon, Arsen und Zinn, bei der Sekundärerzeugung in erster Linie Antimon und Calcium (Classen et al. 2009). Dieses zweistufige Röst-Reduktionsverfahren wird jedoch zunehmend durch modernere kontinuierliche Direkt-Bleischmelzprozesse wie das Queneau-Schuhmann-Lurgi (QSL)- und das Siromelt- oder Badschmelzverfahren ersetzt. Staubförmige Emissionen (vor allem Blei und Cadmium) werden hierbei deutlich reduziert (WVM 2013; Bräutigam et al. 2008). Laut Bräutigam et al. (2008) werden bereits seit 1995 in Deutschland ausschließlich die genannten einstufigen Verfahren eingesetzt, die sich im Verfahrensablauf prinzipiell gleichen. Im aus einer Badschmelzeinheit bestehenden QSL-Ofen durchläuft das Gut nacheinander eine Oxidations- und eine Schlackenreduktionszone. In der Oxidationszone wird bei ca. 1.000°C Sauerstoff direkt in das Bad eingedunstet, wobei Rohblei, eine bleireiche Schlacke und Schwefeldioxid gebildet werden (Bräutigam et al. 2008). In der Reduktionszone erfolgt durch Kohlenstaub unter Zusatz von Luft oder Sauerstoff die Reduktion des Bleioxids aus der bleihaltigen Schlacke zu metallischem Blei, das mit dem Rohblei aus der Oxidationszone vereinigt wird. Anschließend wird das Blei abgestochen, einer Vorentkupferung zugeführt und schließlich in der Raffinationsstufe von verbleibenden Verunreinigungen befreit (Bräutigam et al. 2008).

Halbzeugherstellung

Blei wird zu verschiedenen Halbzeugen wie Bleche, Rohe und Kabelmäntel weiterverarbeitet. Der weitaus größte Teil wird jedoch zu Autobatterien weiterverarbeitet (siehe Tabelle 17).

Anwendungen / Endprodukte

Die Verteilung auf die verschiedenen Anwendungsgebiete ist in Tabelle 17 dargestellt. Dreiviertel des in Deutschland eingesetzten Bleis werden für Akkumulatoren verwendet. Das verbleibende Viertel verteilt sich auf den Einsatz für Kabel, sonstige Halbzeuge sowie die Verwendung in der Glas- und Chemieindustrie. In der chemischen Industrie wird Blei aufgrund seiner chemischen Beständigkeit gegenüber Säuren zur Auskleidung von Rohrleitungen und Apparaten eingesetzt. Daneben werden Bleioxide zur Herstellung von Pigmenten für Farben und Lacke sowie optischen Gläsern eingesetzt (WVM 2013). Andere Anwendungen finden sich beispielsweise in der Medizintechnik, wo es zum Schutz vor Röntgenstrahlung und Radioaktivität eingesetzt wird.

Tabelle 17: Bleianwendungen in Deutschland

Anwendungsfeld	2009	2010	2011	2012
Akkumulatoren (Autoindustrie)	75,9%	76,3%	74,9%	76,1%
Halbzeuge, Kabel, Sonstige Anwendungen	13,8%	13,4%	15,6%	14,2%
Glasindustrie, Chemieindustrie	10,3%	10,3%	9,5%	9,7%

Quelle: WVM 2001-2013

Recycling

Das Recycling von Blei bewegt sich insgesamt auf einem hohen Niveau. Die Sammlung erfolgt produktabhängig über Entsorger und Schrotthändler bzw. im Fall der Autobatterien über Altautoverwerter und Werkstätten. Die Recyclingrate für Blei liegt bei etwa 80 % (WVM 2013). Die Verfahren der meisten bleiproduzierenden Unternehmen sind auch zur Verwertung von Bleiabfällen und -schrotten (Batteriepaste, Bleischrotte, Bleiglas etc.) geeignet (Fthenakis et al. 2009; Bräutigam et al. 2008). Abgesehen von notwendigen Aufbereitungs- und Reinigungsschritten (siehe bspw. Recyclex 2011; Varta 1999) sind die Prozesse der Primär- und Sekundärgewinnung also vergleichbar (siehe Abbildung 7).

Da Akkumulatoren das größte Anwendungsfeld darstellen wird im Folgenden genauer auf diesen Verwertungsweg eingegangen. Relevante Unterschiede bestehen in der Separation und Aufbereitung. Wie erwähnt erfolgt die Sammlung über die Altautoverwerter und Werkstätten. Gemäß AltautoV sind die Batterien zu entnehmen und einer getrennten Verwertung zuzuführen. Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen der Aufbereitung und Trennung nach Stoffklassen mit anschließender Verhüttung und der Säureabtrennung und anschließender Verarbeitung der Batterie als Ganzes (Sullivan und Gaines 2012; Espinosa et al. 2004; Varta 1999). Im letzteren Fall wird die entleerte Batterie zusammen mit Zuschlagsstoffen wie Koks, Kalkstein und Eisen im Schachtofen verhüttet, wobei Roh- oder Werkblei entsteht. Enthaltener Kunststoff wird hierbei nicht zurückgewonnen sondern dient als Brennstoff und Reduktionsmittel zugleich (Sullivan und Gaines 2012). Dieses Verfahren wird unter anderem bei Varta in Krautscheid angewandt (Varta 1999; 2012).

Bei der Aufbereitung mit Trennung nach Stoffklassen werden die Batterien in einem zweistufigen Prozess zerkleinert. Anschließend werden metallisches Blei (z.B. Batteriepole, Bleigitter), Batteriepaste (Bleioxidfraktion) und Kunststofffraktion voneinander getrennt. Letztere wird dem Kunststoffrecycling zugeführt und häufig wieder in Batterien verwendet, wobei nicht rezyklierbare Anteile energetisch verwertet werden. Metallisches Blei und die entwässerte Oxidfraktion werden der metallurgischen Bleirückgewinnung zugeführt, wo Kurtztrommelöfen zur Anwendung kommen (Sullivan und Gaines 2012; GRS 2012; MRU o.J.). Dieses Verfahren wird beispielsweise bei Berzelius angewendet (Metalle pro Klima o.J.; MRU o.J.).

Umweltaspekte

Schwefeldioxid- äquivalente Emissionen in der Primärgewinnung sind durch die Schwefelsäureanlagen zwar deutlich reduziert (JRC 2013), auf etwa 0,022 bis 0,048 kg SO_{2eq} pro kg Blei (Giegrich et al. 2007; PE 2014), bestehen jedoch weiterhin. In der Bleihütte von Berzelius in Stolberg betragen die SO₂-Emissionen im Abgas <200 ppm/Nm³ (Giegrich et al. 2007). Neben SO₂ stellt die Emission von Schwermetallen wie Blei, Cadmium, Antimon, Arsen und Quecksilber ein relevantes Problem dar (Giegrich et al. 2007).

Giegrich et al. (2007) geben die in Tabelle 18 aufgeführten Emissionen bzw. Umweltwirkungen für die Produktion einer Tonne Primärblei an. Zu beachten ist, dass diese auch die außerhalb der Systemgrenzen, d.h. außerhalb Deutschland gelegene Prozessschritte wie Abbau und Aufkonzentrierung einschließen.

Tabelle 18: Umweltbelastungen der Herstellung einer Tonne Primärblei

Umweltwirkung/ Emission	Menge	Einheit
Treibhauseffekt / CO ₂ -Äquivalente	1.459	kg CO _{2e} / t
Versauerung / SO ₂ -Äquivalente	48,3	kg SO _{2e} /t
Feinstaub PM 10	16,5	kg PM10 _e /t
Arsen (in Abgas)	4,1	g/t
Cadmium (in Abgas)	9,1	g/t
Quecksilber (in Abgas)	0,13	g/t
Blei (in Abgas)	577,28	g/t

Quelle: Giegrich et al. (2007)

An Verbäuchen werden für die QSL-Route in JRC (2013) folgende genannt:

- ▶ elektrische Energie: 70 kWh/t Pb
- ▶ Koks: 110 kt/t Pb
- ▶ Gas: 25 Nm³/t Pb bzw. 275 kWh/t Pb
- ▶ O₂: 370 Nm³/t Pb

In Metalle pro Klima (2013) wird der Primärenergiebedarf in der QSL-Route auf ca. 5 GJ/t Werkblei beziffert. Gegenüber konventionellen Produktionsrouten wird eine 50prozentige Reduktion des mit der Produktion verbundenen CO₂-Ausstoßes beschrieben (Metalle pro Klima 2013).

In der Sekundärproduktion werden auftretende Abgase als relevantes Umweltproblem genannt (JRC 2013).

2.2.4 Zink

In Deutschland findet kein Abbau von Zinkerzen mehr statt, ehemals vorhandene Vorkommen wie beispielsweise bei Stolberg im Rheinland oder am Rammelsberg im Harz sind mittlerweile erschöpft (Initiative Zink 2011). Der größte Produzent von Zinkerzen ist heute China mit rund 33 % bis 35 % Anteil an der Weltproduktion, gefolgt von Australien mit 11 – 12 %. Deutschland ist entsprechend zu 100 % auf Importe angewiesen. Wie auch bei Kupfer wird das abgebaute Zinkerz zunächst in relativer Nähe zum Abbauort zu Konzentraten weiterverarbeitet, was durch Mahlen und Flotation erfolgt. Hierbei wird der Zinkgehalt von 5 bis 15% im Erz auf etwa 45 bis 60 % im Konzentrat erhöht (WVM 2013; Initiative Zink 2011; Lauwigi und Dressler 2011; Classen et al. 2009; Gordon et al. 2003).

Wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, erfolgen Blei- und Zinkerzeugung häufig in Verbindung. Die Daten zur Erzeugung von Blei- und Zink bzw. deren Halbzeugen finden sich in Tabelle 16. Die Ein- und Ausfuhr von Zink sowie Vorprodukten und Halbzeugen sind in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Ein- und Ausfuhr von Zink

Schritt	Produkt	2009	2010	2011	2012
Einfuhren nach D	Zn-Erze und –konzentrate	272	285	344	325
	Zn-Sekundärrohstoffe	16	24	27	26
	Fein- und Feinstzink	238	307	339	316
	Hüttenzink	33	57	47	43
	anderes Zn	36	58	71	65
	Zn-Halbzeuge	52	56	68	66
Ausfuhren aus D	Zn-Sekundärrohstoffe	27	29	27	27
	Fein- und Feinstzink	27	29	27	27
	Hüttenzink	35	22	28	31
	anderes Zn	24	32	31	29
	Zn-Halbzeuge	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Quelle: WVM 2001-2013

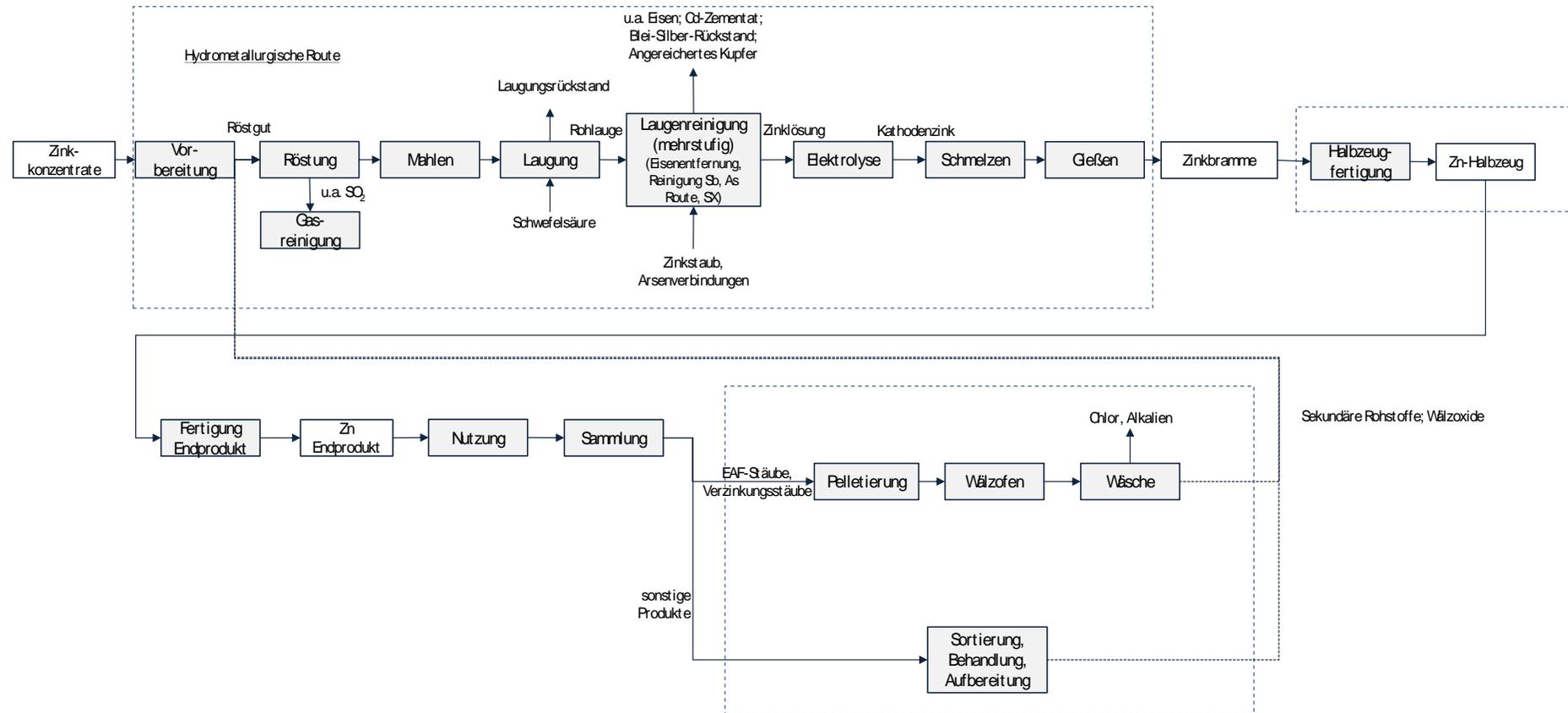
Alle Angaben in Kilotonnen [kt].

Konzentrate werden zur weiteren Verarbeitung nach Deutschland importiert. Daneben findet Zinkimport auch in Form von Fein- und Feinstzink sowie in diversen Halbzeugen statt (WVM 2001-2013). Bis auf den Abbau ist in Deutschland entsprechend die gesamte Prozesskette ab der Weiterverarbeitung der Konzentrate zu finden. Die Konzentrate erhalten in der Regel neben Zink auch Schwefel und andere Metalle wie Eisen, Blei, Kupfer, Cadmium und Silber, welche gemeinsam in den Erzen vorkommen und ggf. als Ko-Produkte der Zinkerzeugung gewonnen werden können (Initiative Zink 2011; Lauwigi und Dressler 2011; Fthenakis et al. 2009; Bräutigam et al. 2008). Eine schematische Darstellung der Prozesskette zur Zinkerzeugung und –verarbeitung findet sich in Abbildung 8.

Für die weitere Verarbeitung der Konzentrate existieren zwei mögliche Verfahrensrouten, Hydro- und Pyrometallurgie, wobei die hydrometallurgische Verfahrensrouten weitaus häufiger zum Einsatz kommt und weltweit etwa 80 % Zinkproduktion mit hydrometallurgischen Verfahren erfolgt (Bräutigam et al. 2008), andere Quellen geben sogar einen Anteil von 90 % für die Hydrometallurgie an (Fthenakis et al. 2009). In Deutschland gibt es nur eine Primärzinkanlage, welche die hydrometallurgische Verfahrensrouten nutzt. Somit machen hydrometallurgische Verfahren in Deutschland 100 % aus. Ein großer Vorteil des Verfahrens liegt in der hohen Reinheit des hergestellten Zinks (Zinkgehalt etwa 99,99 %) (Bräutigam et al. 2008).

In beiden Fällen wird der Ausgangsstoff, das Zinkkonzentrat (meist Zinkblende mit ca. 20 % Schwefelgehalt; weltweit beziffern Gordon et al. (2003) den Anteil von Zinkblende als Inputmaterial auf rund 90 %), zunächst durch Rösten in Wirbelschichtöfen bei ca. 950°C zu Zinkoxid weiterverarbeitet (Initiative Zink 2011; Lauwigi und Dressler 2011; Bräutigam et al. 2008). Hierbei werden die Sulfide von Zink, Cadmium und anderen Metallen in Oxide überführt, es kommt entsprechend u.a. zur Emission von SO₂, welches abhängig vom technischen Stand der Anlagen aufgefangen und zu Schwefelsäure verarbeitet werden kann (WVM 2013; Lauwigi und Dressler 2011), was in Deutschland als gängige Praxis darstellt. Die Gasreinigung erfolgt unter Verwendung von Zyklonen, Wäschern und Elektrofiltern (Bräutigam et al. 2008).

Abbildung 8: Prozesskette Zinkherstellung und -verarbeitung in Deutschland



Quelle: eigene Abbildung nach Roewer 2014; JRC 2013; Outotec 2013; Fthenakis et al. 2009; Bräutigam et al. 2008; Gordon et al. 2003

Hydrometallurgische Route

Neben Zinkkonzentraten können im hydrometallurgischen Verfahren auch sekundäre Rohstoffe wie Wälzoxide, d.h. Stahlwerksstäube aus Lichtbogenöfen, die im Wälzprozess aufbereitet wurden, zum Einsatz kommen (Bräutigam et al. 2008). Da es sich hierbei um Sekundärrohstoffe handelt, wird auf den Wälzprozess zur Aufbereitung der Stäube aus Lichtbogenöfen gesondert im Abschnitt zum Recycling eingegangen.

Das Röstgut wird in der hydrometallurgischen Route im Anschluss an die Röstung gemahlen, bevor es in die Laugung kommt. In der Laugung mit Schwefelsäure werden in einem mehrstufigen Prozess Zink, Cadmium oder Kupfer aus dem Röstgut (und ggf. dem Wälzoxid) extrahiert, wobei die Schwermetalle in lösliche Sulfate überführt werden (Bräutigam et al. 2008). Die Laugungsrückstände stellen das wesentliche Rohmaterial zur Gewinnung von Metallen wie Germanium und Indium dar (siehe bspw. Roewer 2014; Fayram und Anderson 2008). Die bei der Laugung erforderliche Schwefelsäure wird häufig in-House aus dem in der Röstung anfallenden Schwefeloxid hergestellt (Fthenakis et al. 2009). Die in der Laugung entstehende Rohlaugung ist in mehreren Schritten von Begleitstoffen zu reinigen, bevor sie in die Elektrolyse gehen kann. In einem ersten Schritt erfolgt mit Hilfe des Jarosite Verfahrens eine Abtrennung enthaltenen Eisens. Im Folgenden werden schädliche Elemente wie Kupfer, Nickel und Kobalt durch Zusatz von Zinkstaub und Arsenverbindungen ausgefällt (Bräutigam et al. 2008).

Im nächsten Schritt werden durch die Zugabe von Zinkstaub in Schwebebettreaktoren verbliebene Elemente wie Cadmium und Thallium abgetrennt, wobei sogenanntes Zementat entsteht, das mind. 90 % Cadmium enthält (Bräutigam et al. 2008). Die gereinigte schwefelsaure Zinksulfatlösung geht schließlich in die Elektrolyse, in der Kathodenzink mit einer Reinheit von ca. 99,99 % gewonnen wird (WVM 2013).

Pyrometallurgie

Insgesamt haben die pyrometallurgischen Verfahren nur eine untergeordnete Rolle und kommen wie oben beschrieben in Deutschland nicht mehr zum Einsatz. Unter den pyrometallurgischen Verfahren ist der Imperial-Smelting Prozess der relevanteste, der auch für die Verarbeitung von Sekundärmaterialien vielseitig einsetzbar ist (Bräutigam et al. 2008; Classen et al. 2009), jedoch europaweit nur noch in Polen Anwendung findet. In Imperial-Smelting Öfen kann eine simultane Gewinnung von Zink und Blei erfolgen. Auch andere pyrometallurgische Verfahren finden in der Europäischen Union keine Anwendung mehr und verlieren weltweit an Bedeutung. Gründe hierfür liegen u.a. im vergleichsweise hohen Energieaufwand und der niedrigen Effizienz (Lauwigi und Dressler 2011).

Das im Imperial-Smelting Ofen erzeugte Rohzink hat mit einem Zinkgehalt von 97 bis 98 % und höheren Cadmiumanteilen zudem eine deutlich geringere Reinheit als das hydrometallurgisch erzeugte. Zur Herstellung von Feinzink wird daher eine Raffination angeschlossen (Bräutigam et al. 2008).

Halbzeugherstellung

Das Kathodenzink bzw. Raffinadezink wird nach einer Reinigung zu Granalien oder Platten umgeschmolzen bzw. gegossen (Bräutigam et al. 2008). Die weitere Verarbeitung und Legierung bzw. Weiterverarbeitung zu Messing richtet sich nach Endanwendungen. Neben Gießen kommen bei der Halbzeugherstellung in erster Linie umformende Verfahren wie Walzen zum Einsatz (Gordon et al. 2003) oder es erfolgt eine Weiterverarbeitung des eingeschmolzenen Zinks zu Zinkpulver (JRC 2013).

Anwendungen / Endprodukte

Die verschiedenen Anwendungsfelder von Zink in Deutschland sind in Tabelle 20 dargestellt. Den größten Anteil hat die Verzinkung in Bau- und Automobilindustrie, wo sie dazu dient, Stahlbauteile vor

Korrosion zu schützen. Meist erfolgt die Verzinkung der Bauteile elektrolytisch (Galvanisierung) (Clas- sen et al. 2009; Gordon et al. 2003). Auch die weiteren Anwendungsgebiete von Zink konzentrieren sich auf die Bauindustrie.

Tabelle 20: Zinkanwendungen in Deutschland

Anwendungsfeld	2009	2010	2011	2012
Verzinkung (Auto-, Bauindustrie)	32,5%	36,8%	36,1%	36,5%
Halbzeuge (Bauwesen), Zinkgusslegierungen	32,9%	28,5%	27,6%	27,0%
Messing (Bauindustrie)	26,3%	27,6%	25,0%	25,0%
Chemieindustrie (bspw. Zinkoxid)	7,5%	6,3%	10,5%	10,7%
Sonstige	0,8%	0,8%	0,7%	0,8%

Quelle: WVM 2001-2013

Rückgewinnung

Etwa 35 % des heute in Europa erzeugten Zink stammt aus sekundären Quellen, das heißt die Recycling-Input-Rate beträgt etwa 35 % (Initiative Zink 2011). Zu unterscheiden ist zwischen dem Recycling von pre- und post-consumer Schrotten. Den größten Anteil im Zinkrecycling machen Messingschrotte aus, bei denen es sich zum größeren Teil um pre-consumer Abfälle handelt (Lauwigi und Dressler 2011). Andere pre-consumer Abfälle zum Recycling ergeben sich aus der Galvanisierung, aus dem Spritz- und Druckguss sowie sonstigen Fertigungsprozessen (Gordon et al. 2003). Bei post-consumer Abfällen ist zu beachten, dass die meisten Zinkanwendungen eine sehr lange Lebensdauer aufweisen. So geht man bei Zinkblechen beispielsweise von über 50 Jahren aus. Die Recyclingquote für Zinkschrotte wird von der Initiative Zink (2011) mit nahezu 100 % angegeben.

Die Verwertung verzinkter Stahlschrotte im Stahlrecycling ist bei beiden möglichen Routen (Electric Arc Furnace, EAF sowie Basic Oxygen Furnace, BOF), ähnlich. Durch die hohen Temperaturen verflüchtigt sich das Zink, wird mit den Prozessgasen ausgetragen und im Filterstaub gesammelt. In einem weiteren Verfahrensschritt, dem Wälzprozess, findet die Aufkonzentrierung zu Wälzoxiden statt, die wie oben beschrieben in der primären Zinkproduktion eingesetzt werden (Lauwigi und Dressler 2011; Initiative Zink 2011). Neben Stahlwerksstäuben werden in geringerem Umfang im Wälzprozess auch Stäube und Schlämme aus der Verzinkung verarbeitet (Bartusch et al. 2013). Auch in der pyrometallurgischen Verfahrensrouten können Zinkschrotte als Sekundärrohstoffe eingesetzt werden.

Die Stahlwerksstäube, die zwischen 17 und 35 % Zink enthalten (Bartusch et al. 2013; Initiative Zink 2011), werden im Wälzprozess zunächst unter Zugabe von Koks und Kalk pelletiert und unter Eindüsen von Wasser pelletiert (Bartusch et al. 2013). Anschließend werden die Zinkanteile der Pellets im Dreh- bzw. Wälzofen bei 1.100 bis 1.200°C verdampft und zu Zink- bzw. Wälzoxid oxidiert. Über Filteranlagen wird das Wälzoxid gesammelt, die übrigen Bestandteile verbleiben in der Wälzschlacke. Anschließend werden in einer Wäsche Chlor und Alkalien aus dem Wälzoxid entfernt, was anschließend der Zinkgewinnung zugeführt wird (Bartusch et al. 2013; Lauwigi und Dressler 2011).

Umweltaspekte

Schwefeldioxid- äquivalente Emissionen in der Primärgewinnung sind durch die Schwefelsäureanlagen zwar deutlich reduziert (JRC 2013), bestehen jedoch weiterhin. Wie beschrieben wird das SO₂ zur Herstellung von Schwefelsäure verwendet. Neben den SO₂-Emissionen werden laut Giegrich et al. (2007) auch Schwermetalle wie Arsen (12,8 g/t), Cadmium (4,5 g/t), Quecksilber (23 g/t) und Blei

(625 g/t) emittiert. In (JRC 2013) diffuse Emissionen aus diversen Prozessschritten sowie anfallende Abfälle aus der Eisenentfernung als relevante Umweltwirkungen genannt.

Eine Übersicht der Umweltwirkungen der Gewinnung einer Tonne Primärzink (einschließlich der außerhalb Deutschlands stattfindenden Prozessschritte) findet sich in Tabelle 21.

Tabelle 21: Umweltwirkungen der Gewinnung einer Tonne Primärzink

Umweltwirkung/ Emission	Menge	Einheit
Treibhauseffekt / CO ₂ -Äquivalente	2.438	kg CO _{2e} / t
Versauerung / SO ₂ -Äquivalente	39,0	kg SO _{2e} /t
Feinstaub PM 10	9,8	kg PM10 _e /t
Arsen (in Abgas)	12,8	g/t
Cadmium (in Abgas)	4,5	g/t
Quecksilber (in Abgas)	23	g/t
Blei (in Abgas)	625	g/t

Quelle: Giegrich et al. (2007)

In JRC (2013) finden sich folgende Angaben zu den Energieverbräuchen der Zinkherstellung:

Energieverbräuche – Hydrometallurgie (RLE – Roasting, Leaching, Electrowinning) (JRC 2013):

- ▶ Elektrische Energie: 4.000-4.100 kWh/t
- ▶ Koks: 0.48 GJ/t
- ▶ Erdgas: k.A.

Energieverbräuche – Hydrometallurgie, niedriger Eisengehalt im Konzentrat (RLE – Roasting, Leaching, Electrowinning) (JRC 2013):

- ▶ Elektrische Energie: 3.850-4.905 kWh/t
- ▶ Koks: 0.48 GJ/t
- ▶ Erdgas: 12 Nm³/t.

Energieverbräuche Imperial Smelting Route:

- ▶ Elektrische Energie: 1.050 kWh/t
- ▶ Koks: 1.100 GJ/t
- ▶ Erdgas: 220 Nm³/t

2.2.5 Literaturdatenbanksuche zu den vier Fokusmetallen

Wie in der Vorgehensbeschreibung in Abschnitt 2.1 dargelegt, erfolgt in diesem Abschnitt aufbauend auf den zuvor skizzierten Prozessketten zur Herstellung und Verarbeitung der vier Fokusmetalle eine Abfrage der Literaturdatenbank ISI Web-of-Knowledge anhand bibliometrischer Methoden (siehe beispielsweise Ball und Tunger 2005; Glänzel 2012), die darauf abzielt anhand einer Betrachtung wissenschaftlicher Veröffentlichungsaktivitäten Forschungsschwerpunkte bezüglich der Nutzung von Ressourcenschonungspotentialen in der NE-Metallindustrie im Zeitverlauf zu identifizieren.

Die Untersuchung läuft dabei in folgenden Schritten ab:

- ▶ Zunächst erfolgt die Bestimmung der Suchbegriffe zur Datenbankabfrage (*Suchstrings*). Gesucht wird anhand der Suchbegriffe in den *Topics* der Veröffentlichungen, das heißt Titel,

Abstract und Keywords der Veröffentlichungen werden nach den Begriffen durchsucht. Als Veröffentlichungszeitraum wurde 1990 bis 2014 gewählt. Der letzte Datenbankzugriff erfolgt am 20.2.2014.

- ▶ Die entwickelten Suchstrings setzen sich aus verschiedenen Teilen zusammen:
 - Den ersten Teil stellt jeweils das Metall dar, also Aluminium, Kupfer, Blei oder Zink beziehungsweise deren englische Übersetzungen (*aluminum, copper, lead, zinc*).
 - Der weitere Aufbau der Suchstrings orientiert sich zum einen an den Prozessketten der Metalle. Hier werden die verschiedenen Abschnitte der Prozesskette wie Schmelzen (*melting, smelting, smelter*), Raffination (*refining, refinery*) und weitere Verarbeitung (*casting, processing, etc.*) aufgegriffen. Zum anderen wird über ausgewählte Begriffe der Bezug zur Thematik der Ressourcenschonung hergestellt. Hierfür werden Begriffe wie Effizienz (*efficiency*), Optimierung (*optimization*) etc. herangezogen.
- ▶ Die auf diese Weise zusammengesetzten Suchstrings werden im Rahmen von mehreren Durchläufen auf ihre Genauigkeit getestet und weiter verfeinert, das heißt bei einer zu geringen Anzahl relevanter Treffer ergänzt, bei einer zu geringen Gesamtzahl an Treffern (d.h. einer zu spezifischen Formulierung) verallgemeinert. Die Suche bewegt sich dabei in einem Spannungsfeld zwischen zu spezifischen Suchbegriffen, die potentiell relevante Treffer ausschließen, und zu allgemeinen Suchbegriffen, die zu vielen und zu einem großen Teil nicht relevanten Treffern führen.

Hierbei sind verschiedene Hindernisse zu erwähnen. Aufgrund der vielfältigen Einsatzgebiete der untersuchten Fokusmetalle beinhalten die Ergebnisse zu einem großen Teil Ergebnisse, die sich mit den Anwendungen der Metalle befassen, hier also nicht für die Betrachtung relevant sind (z.B. „*Rotordynamic analysis and experimental validation of a high speed induction motor made by copper die casting process*“ oder „*Potential alternative for water and energy savings in the automotive industry: case study for an Austrian automotive supplier*“). Für Kupfer und insbesondere Blei kommt hinzu, dass zahlreiche Veröffentlichungen sich mit Einträgen der Metalle in verschiedene Umweltmedien beziehungsweise der Belastung verschiedener Medien durch die Metalle befassen (z.B. „*Effect of pig nutrition on excretion of nitrogen, phosphorus, copper and zinc in manure and on emissions of ammonia, greenhouse gases and odours*“ oder „*Distribution and Accumulation of Copper and Cadmium in Soil-Rice System as Affected by Soil Amendments*“). Bei Blei ergibt sich zudem eine weitere Schwierigkeiten aus den zusätzlichen Bedeutungen des englischen Wortes „*lead*“.

Die finalen Suchstrings sind in Anhang B aufgeführt.

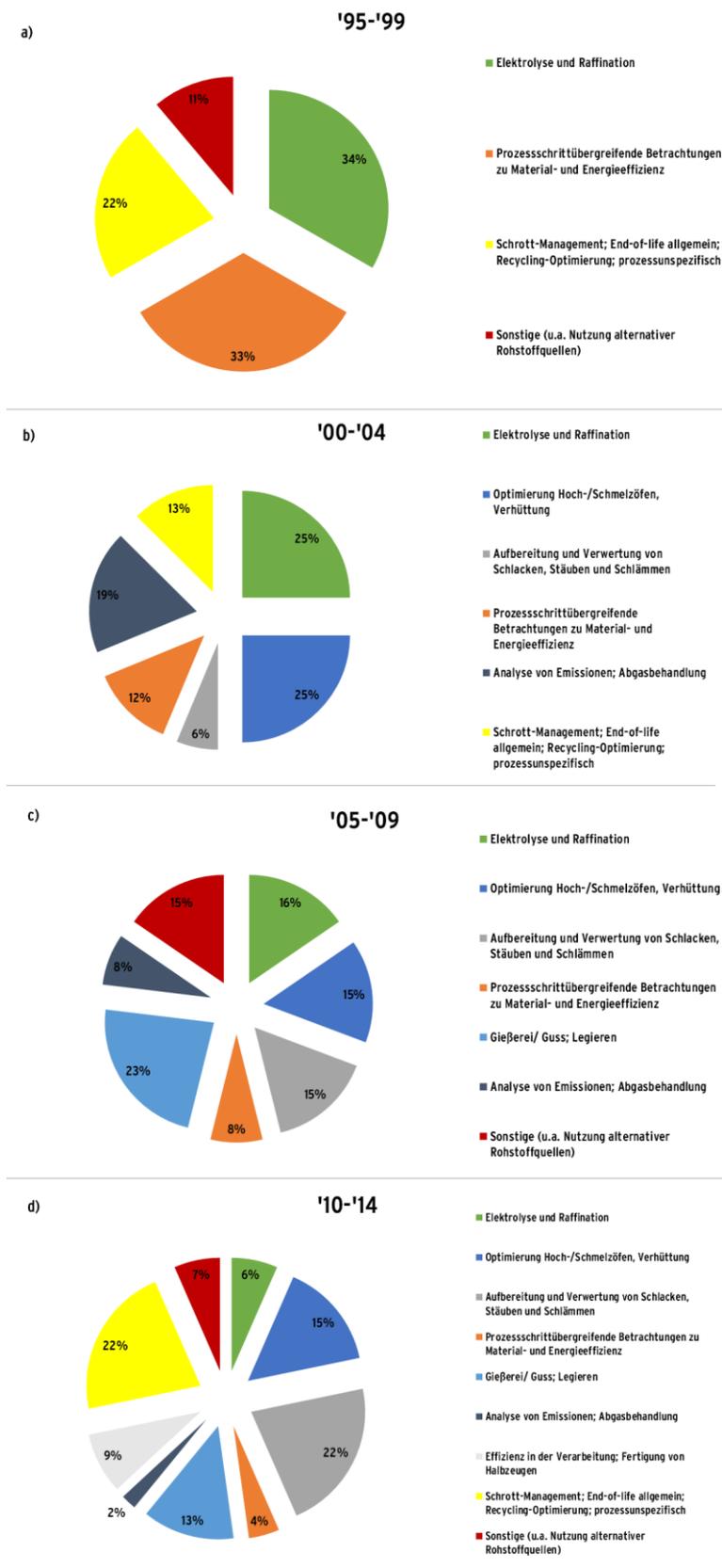
- ▶ Anhand der Titel der identifizierten Veröffentlichungen wurde eine erste Abschätzung des Anteils der im Projektkontext relevanten Treffer getroffen. Aus diesen in der ersten Abschätzung als mutmaßlich relevant eingestuften Veröffentlichungen wurden dann anhand einer Betrachtung der Abstracts irrelevante Veröffentlichungen herausgefiltert, wobei ein nennenswerter Anteil von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen wurde. Neben Veröffentlichungen mit projektfremden Inhalten wurden auch Veröffentlichungen mit einem Fokus auf der reinen Bewertung (Ökobilanzierung, Materialflussanalysen, ökonomische Analysen) bestehender Verfahren ausgefiltert. Ebenfalls herausgefiltert wurden solche Veröffentlichungen, die sich bei mehreren verschiedenen Suchstrings als Suchergebnis ergeben haben. Eine Übersicht über die Ergebnisse dieses Filterprozesses und deren zeitlichen Verlaufs findet sich in Anhang B.
- ▶ Die gefilterten Veröffentlichungen wurden dann bezüglich ihrer Forschungsinhalte gesichtet, parallel hierzu wurden die wissenschaftlichen Akteure (nur deutsche Institutionen) in die Liste potentiell relevanter Akteure für die Durchführung der Delphi-Befragung aufgenommen (Abschnitt 2.6.3).

Die Forschungsinhalte der Veröffentlichungen wurden zur Auswertung in die folgenden Kategorien eingeteilt:

- ▶ Elektrolyse und Raffination;
- ▶ Optimierung Hoch-/Schmelzöfen sowie Verhüttung;
- ▶ Aufbereitung und Verwertung von Schlacken, Stäuben und Schlämmen;
- ▶ Prozessschrittübergreifende Betrachtungen zur Material- und Energieeffizienz;
- ▶ Gießerei/ Gussverfahren und Legieren;
- ▶ Allgemeine Analysen von Emissionen und Abgasbehandlung;
- ▶ Effizienz in der Verarbeitung und Fertigung von Halbzeugen;
- ▶ End-of-Life (Recyclingverfahren, Schrottmanagement;
- ▶ Sonstiges.

Um Trends im Zeitverlauf sichtbar zu machen, wurde der untersuchte Zeitraum in 5-Jahresintervalle eingeteilt, wobei anzumerken ist, dass die Suchstrings für den Zeitraum von 1990 bis 1994 keine Ergebnisse hervorgebracht haben. Die Anteile der Forschungsschwerpunkte für die verschiedenen Zeitintervalle sind in Abbildung 9 dargestellt.

Abbildung 9: Suchergebnisse Web-of-Knowledge: Forschungsschwerpunkte im Zeitverlauf



Relative Anteile der Forschungsfelder im Zeitverlauf als Ergebnis der Abfrage im ISI Web-of-Knowledge; a) 1995-1999; b) 2000-2004; c) 2005-2009; d) 2010-2014

Insgesamt fällt bei der Betrachtung der Veröffentlichungsaktivitäten über die Zeit auf, dass die Inhalte deutlich breiter werden, also die Zahl der in Veröffentlichungen betrachteten Bereiche zunimmt.

Veröffentlichungen zum End-of-life (Recyclingverfahren, Schrottmanagement etc.) finden sich mit schwankenden relativen Anteilen über weite Teile der betrachteten Zeiträume wieder. Veröffentlichungen, die sich mit Optimierungen von Elektrolyse und Raffination befassen, sind über den gesamten Zeitraum vertreten, aber mit einem geringer werdenden relativen Anteil (von 34 % im Zeitraum 1995-1999 auf 6 % im Zeitraum 2010-2014). Ein ähnlicher Trend zeigt sich bei Veröffentlichungen zum Bereich der prozessschrittübergreifenden Betrachtungen. Veröffentlichungen zu Gießerei- bzw. Gussverfahren finden sich ab 2000 mit Anteilen zwischen 13 und 23 % wieder, ähnlich wie Veröffentlichungen zu Optimierungen der Verhüttung bzw. von Hoch- und Schmelzöfen (Anteile in den Betrachtungsintervallen zwischen 15 und 25 %). Erwähnenswert ist der deutliche Zuwachs des Anteils von Veröffentlichungen, die sich mit der Aufbereitung oder Verwertung von Schlacken, Stäuben und Schlämmen befassen von 6 % im Zeitraum 2000-2004 auf 22 % im Zeitraum 2010-2014.

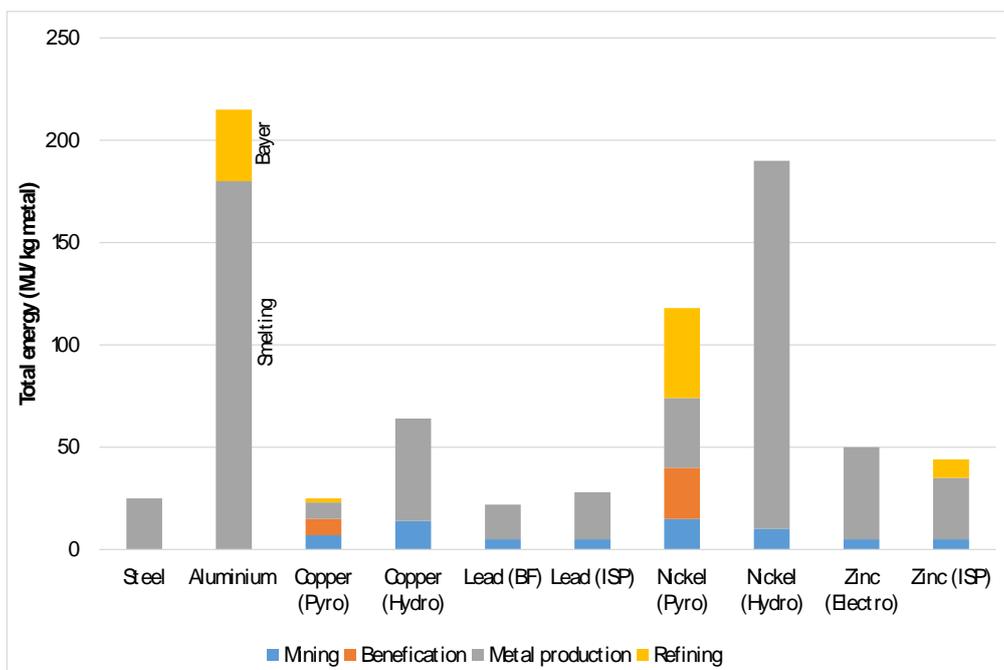
2.2.6 Erweiterte Suche nach Potenzialen entlang der Prozesskette

An die Literaturdatenbanksuche fügt sich eine erweiterte Betrachtung von Ressourcenschonungspotenzialen bzw. „hot spots“ an bezüglich des Energie- und Ressourcenverbrauches in den Prozessketten zur Herstellung und Verarbeitung der vier Fokusmetalle.

2.2.6.1 Energieverbräuche der Metallherstellung: Fokusmetalle in der Übersicht

Abbildung 10 und Tabelle 22 zeigen die Energieverbräuche der Herstellung der vier Fokusmetalle, Aluminium, Kupfer, Blei und Zink sowie von Stahl und Nickel in der Übersicht. Hierbei bestätigt sich zum einen der insgesamt hohe Energiebedarf der Aluminiumerzeugung verglichen mit den meisten anderen Metallen, zum anderen der große Anteil des Aluminiumschmelzens am gesamten Energiebedarf. Von den weiteren Fokusmetallen zeigt Kupfer den größten Energiebedarf, gefolgt von Zink und Blei.

Abbildung 10: Energieverbräuche in Herstellung verschiedener Metalle



Quelle: nach Rankin 2012

Tabelle 22: Energieverbräuche und CO_{2e}-Emissionen verschiedener Prozessrouten zur Herstellung der vier Fokusmetalle

Metall	Prozess	Energieaufwand (MJ/kg)	GWP (kg CO _{2eq} /kg)
Aluminium	Bayer Raffination, Hall-Heroult Prozess	211	22,4
Kupfer	Smelting/convertig and electro refining	33	3,3
	Heap leaching and SX/EW	64	6,2
Blei	Lead blast furnace	20	2,1
	Imperial smelting process	32	3,2
Zink	Elektrolytischer Prozess	48	4,6
	Imperial Smelting Prozess	36	3,3

Quelle: Norgate et al. 2007

2.2.6.2 Energieverbrauch in der Aluminiumindustrie im Speziellen

Aufgrund der besonderen Energieintensität und der CO₂-Emissionen der Aluminiumindustrie finden sich deutlich mehr Studien und sonstige Veröffentlichungen, die sich mit der Aluminiumindustrie befassen als zu den anderen Fokusmetallen. Prinzipiell lassen sich die für Aluminium gewonnen Erkenntnisse zumindest zum Teil auf die anderen Metalle übertragen.

In einer Studie im Auftrag des U.S. Department of Energy aus dem Jahr 2007 wurden Energiebedarfe und Einsparpotenziale in der Aluminiumindustrie untersucht (Choate und Green 2007). Eines der zentralen Ergebnisse der Studie ist eine Untersuchung der Energieverbräuche der Aluminiumindustrie in den USA (Bezugsjahr 2003) in den verschiedenen Prozessschritten und ein Vergleich mit dem theoretischen minimalen Energieeinsatz (Tabelle 23).

Tabelle 23: Energieverbräuche und potenzielle Einsparungen in der U.S. Aluminiumindustrie

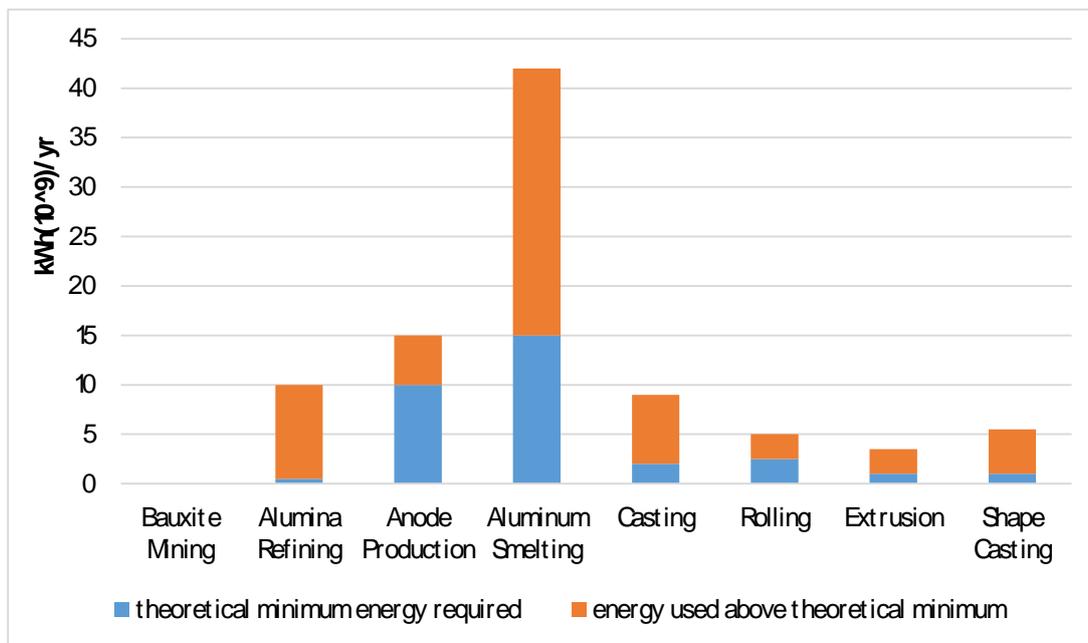
Prozessschritt	U.S. Annual Production 2003 [metric tons]	Theoretical Minimum Energy Requirement [kWh (10 ⁹)/yr]	U.S. Process Energy Required [kWh (10 ⁹)/yr]	Potential Process U.S. Energy Savings [kWh (10 ⁹)/yr]	Total U.S. Gross Energy Required [kWh (10 ⁹)/yr]	Total U.S. Gross Energy Savings [kWh (10 ⁹)/yr]
Alumina Refining	2.661.500	0,37 (0,001)	10,02 (0,034)	9,65 (0,033)	10,89 (0,037)	10,52 (0,036)
Anode Production	1.230.000	12,12 (0,041)	15,75 (0,054)	3,63 (0,012)	16,45 (0,056)	4,33 (0,015)
Al Smelting	2.758.000	16,52 (0,056)	42,97 (0,147)	26,46 (0,090)	128,36 (0,438)	111,84 (0,382)
Primary Casting	2.704.000	0,90 (0,003)	2,73 (0,009)	1,83 (0,006)	3,94 (0,013)	3,04 (0,010)
Secondary Casting	2.820.000	0,94 (0,003)	7,05 (0,024)	6,11 (0,021)	7,93 (0,027)	6,99 (0,024)

Rolling	4.842.600	1,55 (0,005)	3,04 (0,010)	1,49 (0,005)	6,08 (0,021)	4,53 (0,015)
Extrusion	1.826.000	0,80 (0,003)	2,37 (0,008)	1,57 (0,005)	2,77 (0,009)	1,97 (0,007)
Shape Casting	2.413.000	0,80 (0,003)	6,17 (0,021)	5,36 (0,018)	6,37 (0,022)	5,56 (0,019)
Total	k.A.	34,00 (0,116)	90,10 (0,307)	56,10 (0,191)	182,77 (0,624)	148,78 (0,508)

Quelle: Choate und Green 2007

Das mit Abstand größte (absolute) Potenzial wurde hierbei, wie oben bereits erwähnt, beim *Smelting* von Aluminium, also der Gewinnung von Aluminium aus Aluminiumoxid, festgestellt. Relativ betrachtet besteht bei der Aluminiumoxid-Raffination (Gewinnung von Aluminiumoxid aus Konzentraten; Bayer-Prozess) ebenfalls ein erhebliches Potenzial zur Einsparung. Vergleichsweise gut stellt sich die Anodenproduktion dar. Eine anschaulichere Darstellung der theoretischen minimalen Energiebedarfe und der tatsächlichen Verbräuche liefert die folgende Abbildung.

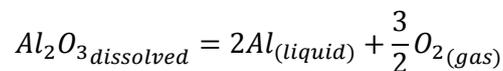
Abbildung 11: Prozessenergieverbräuche in der Aluminiumverarbeitung in den USA



Quelle: nach Choate und Green 2007

2.2.6.3 Verwendung inerter Anoden in der Aluminiumgewinnung

Die herausragende Stellung der Aluminiumelektrolyse bzgl. der entstehenden CO₂-Emissionen liegt zu einem großen Teil in den CO₂-Emissionen durch den Verbrauch der Kohlenstoffanoden begründet. Hier existieren Bemühungen, Verfahrensansätze bzw. Anodenmaterialien zu entwickeln, so dass anstelle von CO₂ O₂ im Elektrolyseprozess emittiert wird (vgl. Abschnitt 2.2.1) (siehe bspw. Helle et al. 2010a). Unter idealen Bedingungen soll die Reaktion unter Einsatz der inerter Anoden entsprechend folgender Reaktionsgleichung ablaufen (Ma et al. 2011):



Verschiedene inerte Materialien wie Keramiken, Metalle und Cermets werden hierbei untersucht, wobei sich bislang kein Material als langfristig tauglich erwiesen hat (Helle et al. 2010a/b; Ma et al. 2011).

Sadoway (2001) bezeichnete bereits 2001 die Suche nach einem inerten Anodenmaterial für die Hall-Héroult Elektrolyse als „the ultimate materials challenge“. Die zentrale Herausforderung ergibt sich hierbei aus der Notwendigkeit einer langfristigen Korrosionsresistenz unter Aluminiumelektrolysebedingungen (Helle et al. 2011). Der russische Hersteller RUSAL berichtet von Plänen, in den nächsten zwei Jahren die ersten Pilotanlagen mit inerten Anoden in Betrieb zu nehmen (RUSAL 2013).

Neben der Reduktion von THG-Emissionen wird inertem Anodenmaterial auch das Potenzial zur Kostenreduktion (durch Eliminierung des Verbrauchs an Kohlenstoffanoden), Kapitaleinsparung (durch Steigerung des Al-Outputs pro Elektrolysezelle), und Reduktion der Personalkosten (durch Wegfall des Anodenaustauschs) (Helle et al. 2010b; Li et al. 2009). RUSAL beziffert die potentiellen Einsparungen bei den Betriebskosten durch Reduktion von Energieverbrauch und Anodeneinsatz auf über 10 % (RUSAL 2013).

Verschiedene der für inerte Anoden untersuchten Materialien sind im Folgenden bspw. aufgeführt, wobei bisher keins dieser Materialien über den Einsatz im Labor- oder Pilotmaßstab hinaus ist:

- ▶ Cu-Ni-Fe Legierungen ($\text{Cu}_x\text{Ni}_{85-x}\text{Fe}_{15}$; 45-70 Gew.-% Cu, 28-42 Gew.-% Ni, 13-17 Gew.-% Fe) (Helle et al. 2010a); bei einem Kupferanteil von 65-70 Gew.-% zeigten sich hierbei die besten Eigenschaften (Helle et al. 2011);
- ▶ Cu-Al-Ni-Fe Legierungen ($\text{Cu}_{92-x}\text{Al}_x\text{Ni}_5\text{Fe}_3$) (Helle et al. 2010b);
- ▶ Cu-Ni-Fe Legierungen ($\text{Cu}_{65}\text{Ni}_{20}\text{Fe}_{15}$) (Goupil et al. 2013);
- ▶ NiFe_2O_4 Cermets (Li et al. 2009);
- ▶ NiFe_2O_4 -10NiO Cermets (Lit et al. 2009);
- ▶ Ni-Cr Legierungen mit α - Al_2O_3 /Au Oberflächenbeschichtung (Ma et al. 2011).

2.2.6.4 CO₂-neutrale Aluminiumindustrie

Das (2012) befasst sich mit der Möglichkeit einer „CO₂-neutralen“ Aluminiumindustrie. Auch wenn das hier angestrebte Ziel der CO₂-Neutralität hauptsächlich durch diverse Gutschriften erreicht werden soll, gibt die Studie einen Einblick darin, in welchen Bereichen besondere Potenziale gesehen werden. Die Schritte zur Erreichung der CO₂-Neutralität werden wie in Tabelle 24 dargestellt zusammengefasst.

Tabelle 24: Schritte zur CO₂-neutralen Aluminiumindustrie

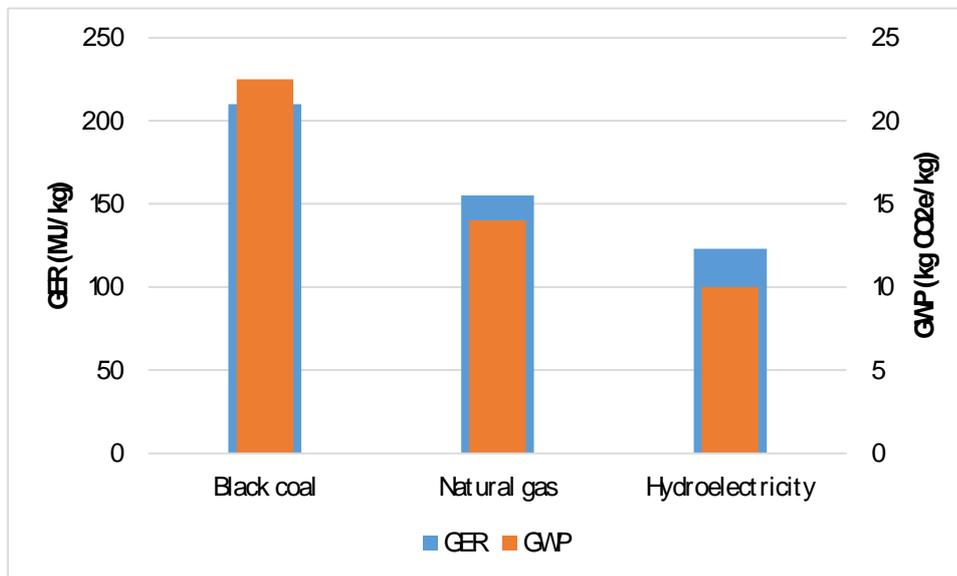
Schritt	CO _{2eq} -Emissionen (Mio. t)	potenzielle CO _{2eq} -Einsparung (Mio. t)
Ausgangspunkt: Welt Aluminium Industrie	500	(-)
Verstärkte Nutzung „grüner Energie“ (+15%)	(-)	27
Reduzierung des Prozessenergiebedarfs um 16%	(-)	79
Verstärkte Nutzung von Aluminium in Anwendungen mit Umweltentlastungspotenzial	(-)	266
Erhöhung der Recyclingquote von 59% auf 75%, Verhinderung der Deponierung von 6,1 Mio. t/a	(-)	74
Urban bzw. landfill mining von 4.5 Mio. t/a	(-)	54
SUMME	500	500

Quelle: Das 2012

Die Potenziale in der Nutzung alternativer bzw. erneuerbarer Energien zur Metallherstellung lassen sich ebenfalls durch eine Betrachtung der Aluminiumherstellung verdeutlichen. Wie in Abbildung 12

dargestellt sind Reduktionen der CO₂-Emissionen um etwa einen Faktor 2 möglich, wenn statt Steinkohle Wasserkraft als Energiequelle herangezogen wird.

Abbildung 12: Energieverbrauch und Emissionen der Aluminiumherstellung in Abhängigkeit vom Energieträger



Quelle: nach Norgate et al. 2007

GER: Gross Energy Requirement; GWP: Global Warming Potential

2.2.6.5 Weitere Energie- und Ressourceneffizienzpotenziale

Ein großes Ressourceneffizienzpotenzial in der Kupferindustrie beschreiben Lemken et al. (2008) in der Steigerung der Recyclingraten von Kupfer von derzeit etwa 55 %. Speziell für die Automobilindustrie, die bereits Abnehmer für etwa 10 % der weltweiten Kupferproduktion ist und für die eine Verdopplung des Kupfergehalts pro Fahrzeug über die nächsten 20 Jahre erwartet wird, wird ein großes Potenzial in diversen Maßnahmen zur recyclinggerechten Konstruktion gesehen. Auch dem urban bzw. landfill mining wird wie bereits für Aluminium beschrieben ein großes Potenzial zugesprochen (Lemken et al. 2008; Lucio et al. 2013). Potenziale in der Steigerung der Recyclingraten bestehen prinzipiell auch bei den anderen Fokusmetallen (Das 2012; Wittmer et al. 2011; Fthenakis et al. 2009). Speziell für Zink werden dissipative Anwendungen wie der Korrosionsschutz von Eisen und Stahl als Lücke im Stoffkreislauf beschrieben. Hier wird die Verwendung von Substituten empfohlen (Wittmer et al. 2011).

Bartusch et al. (2013) befassen sich mit Energie- und Ressourceneffizienzpotenzialen in der Eisen-, Stahl- und Zinkindustrie. Als besondere Probleme wird der Anfall, die Aufbereitung und Verwertung von Stäuben, Schlämmen und Schlacken genannt. In deren Vermeidung oder Verwertung wird ein erhebliches Ressourceneffizienzpotenzial gesehen (Bartusch et al. 2013). Von den verschiedenen Varianten der Verwertung, die untersucht werden, zeigen neben einem Ressourceneffizienzpotenzial auch alle einen positiven ökonomischen Effekt.

2.2.6.6 Best-Practice Beispiele aus der NE-Metallindustrie

Im Folgenden sind diverse „Best Practice“-Beispiele gesammelt, die einen Überblick über verschiedenste Ansätze zur Steigerung der Ressourcen- bzw. Material- und Energieeffizienz in der Herstellung und Verarbeitung von NE-Metallen geben.

Hierfür wurden die Webauftritte des Umweltinnovationsprogrammes (www.umweltinnovationsprogramm.de; Umweltbundesamt 2014b) und der Initiative Metalle pro Klima (<http://www.metalleproklima.de/bestpractice/>; Metalle pro Klima 2014) sowie die Seite www.cleaner-production.de des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt 2014a) herangezogen. Neben diesen Seiten, die sich auf Projekte in Deutschland beziehen, wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber Vorhaben der kanadischen Firma Hatch Ltd. (http://www.hatch.ca/Mining_Metals/Light_Metals/Articles/default.htm; Hatch 2014) und einzelne weitere umgesetzte Vorhaben (bei Heger Ferrit sowie TRIMET; Heger Ferrit o.J.; Flesch 2013) betrachtet.

Komplett ausgeschlossen von der Betrachtung wurden solche Beispiele, die sich auf technologisch gänzlich andere Anwendungen bezogen (bspw. Errichtung und Betrieb eines Geothermie-Kraftwerks zur Strom- und Wärmeerzeugung) oder sich auf Anwendungen von NE-Metallen wie bspw. den Einsatz von Aluminium im Leichtbau oder der Zinkbedachung mit integrierten Warmwasser-Kollektoren beziehen und somit keinen direkten Bezug zum Projekt aufweisen.

Die in den verschiedenen Projekten behandelten Themen sind in Tabelle 25 zusammengefasst. Eine vollständige Liste der berücksichtigten Vorhaben findet sich im Anhang in Anhang C2.

Ein großer Teil der Vorhaben befasst sich mit der Installation neuer sowie der Optimierung vorhandener Öfen sowie von Brennersystemen. Auch der Einsatz regenerativ befeuerter Brennstoffe spielt hierbei eine Rolle. Daneben befassen sich diverse Vorhaben mit der Optimierung von Gussverfahren, sowohl die Prozesse selbst als auch Hilfsmittel wie Sand und Binder betreffend. Im Bereich des EOL beziehen sich die Vorhaben auf eingesetzte Anlagen, produktspezifische Ansätze (bspw. Recycling von Blei-Akkus oder Elektronikprodukte) sowie die Verwertung von Shredderfraktionen. Die Vorhaben, die sich mit der Fertigung von Halbzeugen befassen, beziehen sich auf verschiedene Prozessschritte wie Härten, Verzinkung, Walzen und Vorerwärmung zum Walzen.

Tabelle 25: Inhalte von Best-Practice Vorhaben entlang der Prozessketten

Bereich	Schlagworte
Öfen / Brennersysteme / Schmelztechnik und –verfahren	Einsatz moderner Öfen Optimierung Ofensteuerung Optimierung Brenner und Brennersteuerung (u.a. Optimierung Gaszufuhr) Einsatz regenerativ befeuerter Brennersysteme Optimierung Röstgut-Mahlen (Zinkherstellung) Optimierte Fabrikplanung Optimierte Gussverfahren (Binder, Sandaufbereitung, Einsatz nanostrukturierter Oxide,
Recycling / EOL	Innovative Schmelztechnik für das Recycling von Kupferschrotten* Optimierung eines Schmelzofens* (Recycling, Optimierung Brennersystem) Neue Öfen zum Al-Recycling Verfahrensentwicklung, allgemein Recycling von Blei-Akkus Verwertung Schredderleichtfraktion Verfahren Elektronikrecycling
Halbzeugfertigung	Optimierung Al-Bolzenvorerwärmung, Vorerwärmung sonstiger Werkstücke Selective Laser Melting Härten Verzinkung Beizen und Walzen (Kupfer, Blei, Zink)

2.2.7 Komplementäre Technologien

Komplementäre Technologien sind solche, die gemeinsam mit den untersuchten Technologie, d.h. den beschriebenen Prozessketten zur Herstellung und Verarbeitung der vier Fokusmetalle, eingesetzt werden. In Bezug auf die Fragestellung nach Ressourcenschonungspotentialen in der NE-Metallindustrie lassen sich die komplementären Technologien am ehesten durch den Begriff der Produktionsinfrastruktur beschreiben; von Relevanz im Projektkontext (d.h. bezüglich Ressourcen- und Energieschonungspotentialen) sind hierbei zum einen Technologien zur dezentralen Energiebereitstellung (Strom und Wärme) sowie zur Energierückgewinnung (Wärme und Strom). Um für das Projekt relevante Innovationen und Entwicklungen aus dem Bereich der komplementären Technologien zu identifizieren, wird in drei aufeinander abgestimmten Schritten vorgegangen:

- ▶ Im ersten Schritt erfolgt wie auch in Abschnitt 2.2.5 eine Literaturreisearchsuche (ISI Web-of-Knowledge, letzter Zugriff am 15.02.2014) nach wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die sich auf die vier Fokusmetalle sowie die oben beschriebenen Felder der dezentralen Energiebereitstellung und der Energierückgewinnung beziehen.
- ▶ Im zweiten Schritt wird der Fokus der Suche erweitert. So sollen auch sogenannte Cross-Industry-Technologien (bzw. Innovationen) identifiziert werden, d.h. Innovationen, die sich bspw. auf andere NE-Metalle beziehen, sich aber ggf. auf die vier Fokusmetalle dieser Studie übertragen lassen.
- ▶ Im dritten Schritt wird in einer noch weiter gefassten Internet-Suche nach Beispielen aus der Praxis gesucht. Diesem breiten Screening liegt der Gedanke zu Grunde, dass Innovationen aus dem Bereich der komplementären Technologien häufig - noch - nicht über wissenschaftliche Veröffentlichungen, sondern eher zunächst über Projektberichte, Pressemitteilungen oder sonstige graue Literatur bekannt gemacht werden.

Abschließend werden die Erkenntnisse aus den drei Schritten zusammengetragen.

2.2.7.1 Datenbanksuche nach Innovationen aus dem Bereich der komplementären Technologien

Für die Suche in der Datenbank ISI Web of Knowledge wurden anhand der vier Fokusmetalle und der beschriebenen relevanten Technologieaspekte (dezentrale Energieerzeugung und Energierückgewinnung) Suchstrings gebildet. Anhand der Suchstrings wurden die Topics der in der Datenbank enthaltenen Veröffentlichungen, d.h. deren Titel, Abstracts und Keywords, durchsucht.

Die Suchstrings setzten sich aus drei Teilen zusammen, eine Auflistung der Suchstrings findet sich in Anhang B. Den ersten Teil bilden die vier Fokusmetalle bzw. in einer erweiterten Suche auch die Begriffe „*non-ferrous metals*“ sowie die Metalle Nickel, Magnesium und Zinn. Der zweite Teil der Suchstrings ergibt sich aus den Abschnitten der Prozessketten zur Metallherstellung und Verarbeitung (*refining, smelting* etc.). Der dritte Teil stellt den Bezug auf die hier relevanten Aspekte der Ressourcenschonung her („*heat recovery*“, „*energy recovery*“, etc.).

Insgesamt lieferten die so gebildeten Suchstrings eine recht überschaubare Zahl von Publikationen als Ergebnis, von denen wiederum nur ein geringer Teil eine tatsächliche Relevanz in Bezug auf die Fragestellung aufwies. Eine Erweiterung der Suchbegriffe („*production*“ und „*processing*“ anstatt der einzelnen Abschnitt der Prozesskette) lieferte eine etwas höhere Zahl an Ergebnissen, jedoch ebenfalls mit nur einer geringen Anzahl relevanter Treffer.

Die zentralen Forschungsgegenstände der relevanten Veröffentlichungen sind in Tabelle 26 dargestellt. Aufgrund der absolut geringen Zahl relevanter Veröffentlichungen wird auf eine Auswertung im Zeitverlauf (vgl. Abschnitt 2.2.5) verzichtet.

Wie aus Anhang B und Tabelle 26 ersichtlich, sind für Aluminium mit Abstand die meisten Veröffentlichungen zu finden, der Schwerpunkt liegt hier auf der Rückgewinnung bzw. Verwendung ungenutzter

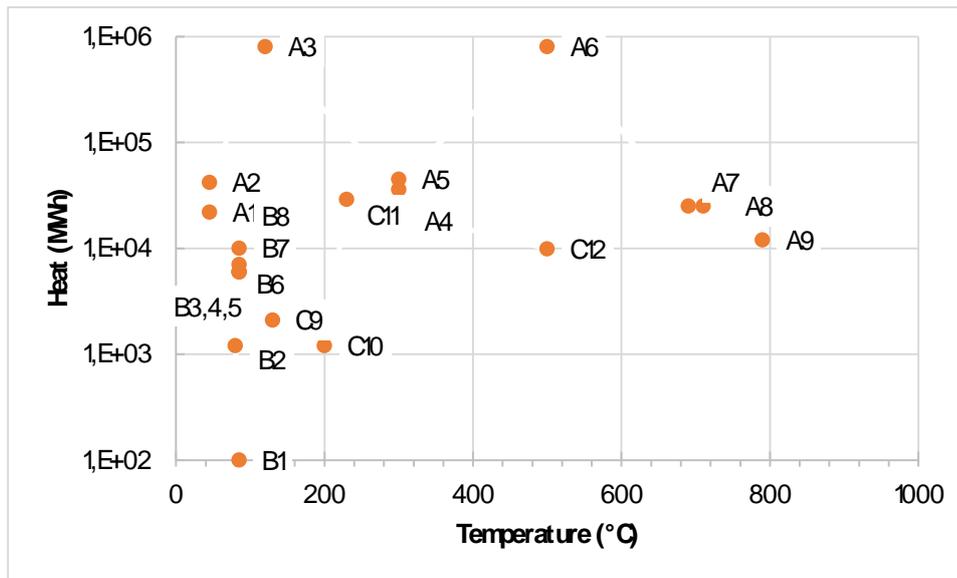
Abwärme. Für Kupfer und Zink ergab die Datenbankabfrage hingegen nur wenige Ergebnisse, wobei hier ebenfalls der Schwerpunkt auf der Abgas- bzw. Abwärmenutzung liegt. Keine Ergebnisse ergab die Suche für Blei.

Tabelle 26: Relevante Schlagwörter der Publikationen zu komplementären Technologien

Metall	Schlagwörter	Quellen
Kupfer	<ul style="list-style-type: none"> - Waste heat recovery - Reuse of flue gas - Process gas handling 	Yu et al. 2011; Cocquerel et al. 1999
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> - Energy self generation - Anode pre-heating - waste heat recovery (from electrolysis and other processes) and reuse for various applications (including desalination processes) - new cooling technologies - energy recovery from anodes, electricity production - smarter furnaces (lower fuel consumption) - energy recovery from flue gas 	Lucio et al. 2013; Fortini 2011; Ladam et al. 2011; Namboothiri et al. 2009; Solheim et al. 2009; Nowicki et al. 2012; Migchielsen 2005; Gavlas et al. 2013; Nowicki und Gosselin 2012; Hadi Fansalek und Kamaliz 2012; Simpson et al. 2011; Villar et al. 2012; Peterson und Belt 2009
Blei	(-)	(-)
Zink	<ul style="list-style-type: none"> - waste heat recovery - increasing efficiency of waste heat boilers 	Jarvi et al. 2002

Dieses Bild lässt sich zum einen auf den Stellenwert von Aluminium als meist verwendetes Nichteisenmetall zurückführen. Zum anderen lässt sich dies durch den vergleichsweise hohen Energiebedarf der Aluminiumproduktion erklären, der auch in zahlreichen Publikationen hervorgehoben wird (bspw. Nowicki und Gosselin 2012; Belt 2012; Norgate et al. 2007). Da hier die Energiekosten etwa 40 % der Gesamtkosten ausmachen (Nowicki und Gosselin 2012), wird hier neben dem ökologischen auch ein großes ökonomisches Potenzial gesehen. Etwa die Hälfte der in der Aluminiumproduktion eingesetzten Energie, geht als Abwärme verloren. Eine Untersuchung der Anlage Alcoa Deschambault Quebec in Kanada von Nowicki und Gosselin (2012) ergab beispielsweise 7,8 MWh Abwärme pro Tonne Aluminium. Nach derzeitigem Stand der Technik seien hiervon etwa 34 % nutzbar (Nowicki und Gosselin 2012). Der größte Teil der Abwärme stammt hierbei aus der Elektrolyse. Eine Übersicht von Abwärmequellen in der Aluminiumproduktion findet sich in Abbildung 13.

Abbildung 13: Abwärmquellen



Quelle: basierend auf Nowicki und Gosselin (2012)

Abwärmquellen: A1 – Air compressor cooling loop; A2 – Casting water; A3 – Potline exhaust gas; A4 – Baking furnace exfiltration; A5 – Baking furnace exhaust gas; A6 – Pot surfaces; A7 – Baking furnace top surface; A8 – Holding furnace top surface (during casting); A9 – Baking furnace (before casting); Abwärmesenken: B1 – Gate house; B2 – Administration building; B3 – Mobile equipment storage and repair; B4 – Potline annexes and crucible cleaning; B5 – Warehouse and central maintenance shop; B6 – Potline to baking sector corridor; B7 – Cast house; B8 – Crane repair, pot lining and re-lining; C9 – Paste plant coke pre-heaters; C10: Cast house pre-heaters; C11 – Hypothetical alumina pre-heating; C12 – Hypothetical anode pre-heating

2.2.7.2 Cross-Industry-Innovationen

In anderen Industriezweigen (Stahlerzeugung und -verarbeitung; Erzeugung und Verarbeitung sonstiger NE-Metalle) lassen sich keine prinzipiell unterschiedlichen Ansätze bezogen auf den Einsatz komplementärer Technologien zur Steigerung von Ressourcen- und Energieeffizienz feststellen. So liegt beispielsweise auch bei Publikationen, die sich auf die Stahlverarbeitung beziehen, der Schwerpunkt auf der Abwärme- und Abgasverwertung (siehe bspw. Maruoka und Akiyama 2006).

Als zentraler Cross-Industry-Ansatz zur Steigerung der Energieeffizienz kann das Energiemanagement bezeichnet werden (siehe bspw. Müller et al. 2013; Peterson und Belt 2009). Zwei beispielhafte Definitionen aus der Literatur sind im Folgenden aufgeführt:

“Essentially it involves monitoring, measuring, recording, analyzing, critically examining, controlling and redirecting energy and material flows through systems so that least power is expended to achieve worthwhile aims” (O’Callaghan und Probert 1977)

“Energy management is the strategy of meeting energy demand when and where it is needed. This can be achieved by adjusting and optimizing energy using systems and procedures so as to reduce energy requirements per unit of output while holding constant or reducing total costs of producing the output from these systems. [...] The objectives of energy management are: To minimize energy costs/waste without affecting production and quality and to minimize environmental effects” (Abdelaziz et al. 2011)

Neben den Vorgaben der einschlägigen Normen (ISO 50001; VDI Richtlinie 4602) wird die Nutzung eigener, dezentraler und erneuerbarer Energieerzeugungstechnologien wie Photovoltaik, Solarther-

mie, Wind- und Wasserkraft als mittlerweile in der Regel profitabler Bestandteil eines Energiemanagements genannt, der zudem die Abhängigkeit von steigenden Energiepreisen senkt (Müller et al. 2013).

Auch unter den Begriff des Energiemanagements lassen sich Ansätze zum Demand-Side-Management fassen, also Ansätze, die auf eine Verbrauchs- bzw. Nachfragesteuerung abzielen, die sich nach der gesamten Stromversorgung bzw. nach dem Angebot an (erneuerbarer) Energie richtet. Eine entsprechende Lösung wurde beispielsweise bei TRIMET Aluminium in Essen untersucht (Flesch 2013; siehe auch best-practice Beispiele im folgenden Abschnitt). Hier soll die Leistung der Elektrolysezellen um +/- 25 % variiert werden, um auf Angebotsschwankungen erneuerbarer Energien reagieren zu können.

Insgesamt legen viele Studien noch erhebliches Potential im Bereich des Energiemanagements in der Industrie insgesamt und insbesondere in der Metallerzeugung und -verarbeitung nahe (Bunse et al. 2011; Maruoka und Akiyama 2006; Lehner und Wiklund 2000). Trotz der ökonomischen, ökologischen und teilweise sozialen Vorteile, kommt es häufig nicht zur Umsetzung energieeffizienzsteigernder Maßnahmen. Zu den Gründen hierfür zählen unter anderem fehlendes Kapital, Investitionsentscheidungen auf Grundlage von Amortisationszeiten oder fehlende Informationen (Bunse et al. 2011; Dürr und Bauernhansl 2013).

2.2.7.3 Erweiterte Suche nach Innovationen im Bereich der komplementären Technologien/ Best-Practice Beispiele

Wie zu Beginn des Abschnitts dargelegt, kommt neben wissenschaftlichen Veröffentlichungen auch sogenannter grauer Literatur, was hier auch Projektberichten, Pressemitteilung oder sonstige Öffentlichkeitsarbeit einschließen soll, eine zentrale Rolle bezüglich der Identifizierung von Handlungsfeldern zur Ausschöpfung von Ressourcenschonungspotentialen durch den Einsatz komplementärer Technologien zu.

Analog zur Betrachtung der Prozessketten in Abschnitt 2.2.6 wurden auch für den Bereich der komplementären Technologien „Best Practice“-Beispiele gesichtet. In einigen Fällen ist eine scharfe Abgrenzung zu den eigentlichen Prozessketten nur schwer durchführbar, so dass die bzgl. der komplementären Technologien gesammelten Beispiele, teilweise auch der Prozesskettenbetrachtung hätten zugeordnet werden können. Die Inhalte der gesichteten Beispiele sind in Tabelle 27 zusammengefasst, die vollständige Liste der Vorhaben findet sich in Anhang C1.

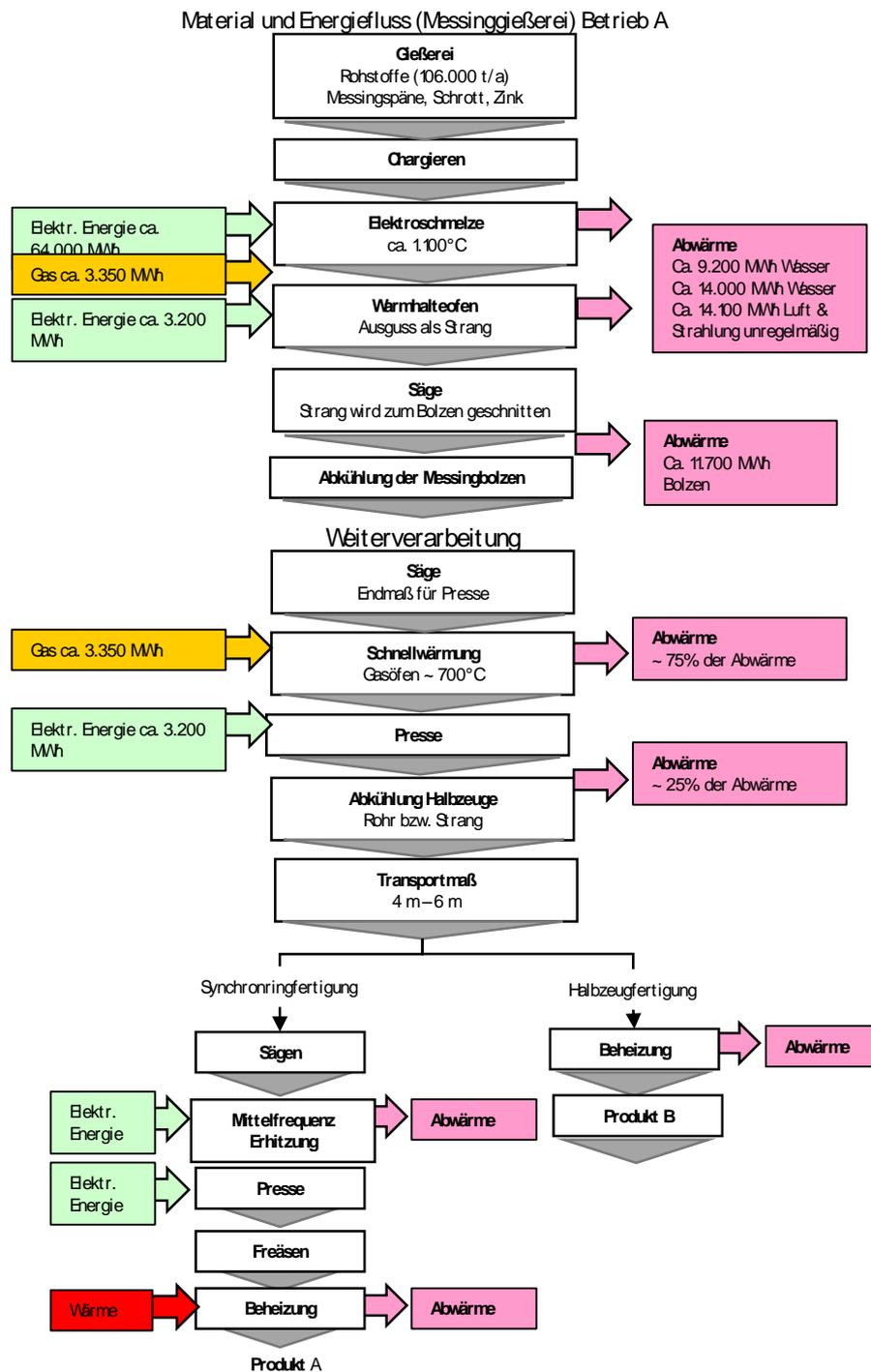
Tabelle 27: Inhalte von Best-Practice Vorhaben aus dem Bereich der komplementären Technologien

Bereich	Schlagworte
Effizienzsteigerung	Installation modernerer Anlagen (Transformatoren, Gas-Brennwertkessel, Pufferspeicher Wärmeisolation Anlagenoptimierung (Kesseloptimierung,
Abfälle	Prozesssteuerung zur Reduktion von Schrottanfall Rotschlammverwertung Abwasseraufbereitung Aufbereitung von Zinkbädern
Abwärmenutzung	Abwärmenutzung u.a. von Schmelzöfen, Kompressoren; Installation von Abgaswärmetauschern; Nutzung zur Luftvorerwärmung, Fußbodenheizung Abwärmenutzung zur Stromerzeugung (Organic-Rankine Cycle)
Energiemanagement	Demand-Side-Management

Unter den gesichteten Vorhaben stellen Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung den Schwerpunkt dar. Neben der direkten Nutzung der Abwärme als Lieferant thermischer Energie findet sich auch ein Vorhaben zur Nutzung der Abwärme zur Stromerzeugung über ORC Anlagen. Weiterhin kommt der Effizienzsteigerung durch neue Anlagen sowie der Optimierung und Isolation bestehender Anlagen eine gewisse Bedeutung zu. Im Bereich der Abfälle finden sich mehrere Vorhaben zur Rotschlammverwertung der Aluminiumgewinnung, sowie Vorhaben zur Prozessoptimierung zur Reduzierung des Abfallanfalls, ein Vorhaben zur Wasseraufbereitung und ein Vorhaben zur Aufbereitung und Standzeitverlängerung von Zinkbädern in der Verzinkung. Weiterhin findet sich ein Vorhaben zum Demand-Side-Management auf das weiter unten eingegangen wird.

Die besonderen Einsparpotenziale im Bereich der Wärmerückgewinnung werden auch durch andere Studien bestätigt. Abbildung 14 zeigt die Energieflüsse in einer Messinggießerei, die im Rahmen des Projektes „Effiziente Energieverwendung in der Industrie“ (siehe Stephan et al. 2005), das von der FH Nürnberg sowie mehreren Partnern im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz durchgeführt wurde. Es zeigt sich, dass auch hier große Energieverluste durch ungenutzte Abwärme entstehen. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei drei ebenfalls im Rahmen des Projektes untersuchten Aluminiumgießereien, wo signifikante Energieverluste durch ungenutzte Abwärme auftreten.

Abbildung 14: Material- und Energieflüsse einer Messinggießerei



Quelle: nach Stephan et al. 2005

Eine Sammlung von Maßnahmen zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz bzw. zur Reduktion von CO₂-Emissionen in der Eisen- und Stahlindustrie findet sich beim VDMA (2013). Die Maßnahmen sind in Tabelle 28 aufgeführt und können auch für die NE-Metallindustrie als mögliche Maßnahmen herangezogen werden bzw. decken sich bereits mit den sonstigen identifizierten Ansätzen.

Tabelle 28: Auswahl von Maßnahmen zur CO₂-Reduktion in der Eisen- und Stahlindustrie

Prozessschritt	Ansatz zur CO ₂ -Verminderung	Potenzial pro kg CO ₂ pro Tonne
Sinteranlage	- Sinteranlage mit Wärmerückgewinnung	- bis zu 57
	- Einsatz von Ersatzbrennstoffen (z.B. Schmierstoffe) in der Sinteranlage	- bis zu 20
Koksofen	- Koks-Trockenkühlung	- bis zu 27
Hochofen	- Einsatz von hochreinem Erz	- 15 – 80
	- Direkteinblasung von Reduktionsmitteln	- 35 – 47
	- Verbesserte Hochofensteuerung	- bis zu 55
	- Automation von Winderhitzern	- bis zu 22
Direktreduktion	- Kohlevergasung (Syngas)	- prozessabhängig
Konverter (BOF)	- Energierückgewinnung aus Konvertergas	- bis zu 46
	- Erhöhte Energieeffizienz durch Automation	- 15 – 16
Lichtbogenofen	- Schrottvorwärmung	- bis zu 35
	- Einsatz heißes DRI	- bis zu 35
	- Verbesserte Prozesskontrolle	- bis zu 17
	- Transformatorenwirkungsgrad	- bis zu 10
	- Bodenrühren/ Gasspülung	- bis zu 11
Stranggießen	- Dünnbrammengießen	- jeweils etwa 50% im Vergleich zum kontinuierlichen Brammengießen
	- Heißgießen	
Warm-/ Kaltwalzen	- Automatisierte Überwachungssysteme	- bis zu 35
	- Rekupatorenbrenner	- bis zu 35
	- Heißeinsatz/ direktes Walzen	- bis zu 30
	- Wärmerückgewinnung (Glühlinie)	- bis zu 17
	- Prozessregelung der Warmbreitbandstraße	- bis zu 15
Allgemein	- Kraft-Wärme-Kopplung	- bis zu 82
	- Vorbeugende Instandhaltung	- bis zu 35
	- Energieüberwachungs-/ Managementsysteme	- bis zu 9

Quelle: VDMA (2013)

Eine Untersuchung von Ansätzen zur Energieeinsparung in metallherstellenden und -verarbeitenden Betrieben auf verschiedenen Ebenen findet sich bei Duflou et al. (2012). Bezüglich der niedrigsten Ebene, der *Unit Process* Ebene, werden hier folgende Erkenntnisse aufgeführt (Duflou et al. 2012):

- ▶ Durch eine Umgestaltung (Re-Design) der Maschinen und Werkzeuge sowie eine selektive Steuerung sind in manchen Betrieben signifikante Steigerungen der Energieeffizienz ohne Beeinflussung der Produktivität möglich. In Fallstudien wurden Verbesserungen der Energieeffizienz von einem Faktor 1,2 bis 3 erreicht. Als wesentliche Ursache hierfür wird gesehen, dass häufig die Energieeffizienz keine Priorität bei der Entwicklung von Maschinen und Anlagen genießt.
- ▶ Durch eine Optimierung der Prozessparameter wurde in den untersuchten Fallstudien eine Steigerung der Energieeffizienz um einen Faktor 1,1 erreicht.

Auf der nächsten betrachteten Ebene der *multi-machine systems* wurde im Wesentlichen die Kaskadennutzung von Exergie als Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz identifiziert (Duflou et al. 2012). In den untersuchten Fallstudien zeigte sich hierbei eine Steigerung im einen Faktor 1,2. Auf Fabrik-Ebene wurden hingegen folgende Erkenntnisse gewonnen (Duflou et al. 2012):

- ▶ Mangelhafte Gebäude- und Fabrikplanung kann zu deutlich gesteigertem Energieverbrauch beitragen.
- ▶ Durch moderne Gebäudegestaltung lassen sich in manchen Fällen signifikante Energieeinsparungen in Heizung und Lüftung bzw. Klimatisierung erreichen.

Mögliche Verbesserungen durch eine optimierte Gebäude- und Fabrikplanung zeigen sich am Beispiel der Heger Ferrit (siehe Heger Ferrit o.J.). Durch eine optimierte Fabrikplanung konnte hier der Energieeinsatz pro Tonne erzeugtem Eisenguss um 200 kWh reduziert werden. Der ringförmige Aufbau der im Jahr 2009 eingeweihten Anlage in Sembach folgt den Prozessabläufen in der Produktion, wodurch u.a. Wartezeiten deutlich verkürzt werden konnten und verschiedene Prozesse störungsfrei und unabhängig voneinander ablaufen können.

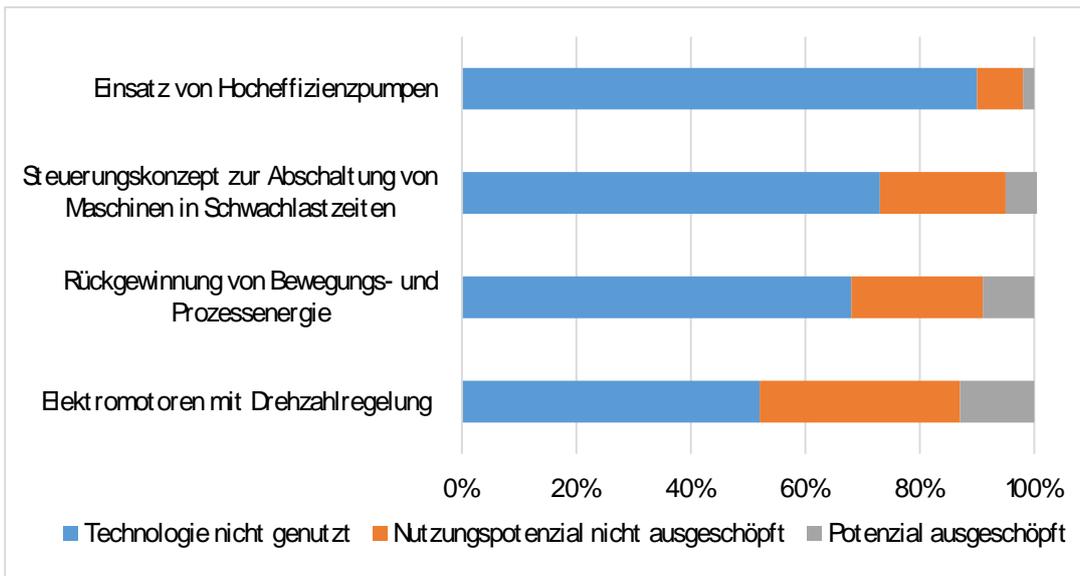
Als weiterer Ansatz zur Energie- und Ressourceneinsparung auf *multi-facility* Ebene wird der Ansatz der *Industrial Symbiosis* diskutiert, worunter der Austausch und die gegenseitige Nutzung von Energie- und Materialströmen, insbesondere von Abfallprodukten und Abwärme, zwischen verschiedenen Betrieben verstanden wird, was insgesamt zu einer Steigerung der Material- und Energieeffizienz der Produktion führt (Duflou et al. 2012). Chertow (2000) definiert *Industrial Symbiosis* wie folgt:

„Industrial Symbiosis engages traditionally separate industries in a collective approach to competitive advantage involving physical exchange of materials, energy, water, and/or by-products.“

Abwärme aus metallverarbeitenden Betrieben kann beispielsweise in Fischzuchtbetrieben oder zu Heizzwecken in Gewerbe- und Wohngebieten verwendet werden, Aschen können einen Input für die Zementindustrie darstellen, Dampf kann als Input für Raffinerien und Biotechnologieunternehmen dienen (Duflou et al. 2012). Umsetzungsbeispiele für größere *Industrial Symbiosis* Vorhaben finden sich jedoch mit Ausnahme des bekannten Beispiels Kalundborg kaum.

Eine beispielhafte Übersicht unerschlossener Einsparpotenziale in der Industrie insgesamt (ohne Fokus auf die NE-Metallindustrie) von Dürr und Bauernhansl (2013) findet sich in Abbildung 15.

Abbildung 15: Unerschlossene Einsparpotenziale ausgewählter Effizienztechnologien



Quelle: nach Dürr und Bauernhansl 2013

Als wichtige Erfolgsfaktoren für die Nutzung vorhandener Energieeinsparpotenziale werden hier Sensibilität, Transparenz und notwendige Informationsbasis der Unternehmen und Akteure beschrieben. Daneben werden wie bereits zuvor beschrieben, die zu hohen Anforderungen an Amortisationszeiten in der Industrie als häufiges Hindernis zur Nutzung von Einsparpotenzialen dargestellt. Hierdurch werden trotz hohem Einsparpotenzial und erwiesener Rentabilität häufig effizientere Technologien nicht eingesetzt (Dürr und Bauernhansl 2013).

2.2.8 Geplante und laufende Forschungsvorhaben

Wie in Abschnitt 2.1 dargelegt, erfolgt im Folgenden eine Betrachtung von Forschungsvorhaben, die einen Bezug zur Ressourcenschonung in der NE-Metallindustrie aufweisen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf in Deutschland durchgeführten Forschungsvorhaben. Zusätzlich erfolgt ein Screening von Forschungsvorhaben auf EU-Ebene.

Für die Recherche der Forschungsvorhaben in Deutschland wird die Förderdatenbank „Förderprogramme und Finanzhilfen des Bundes, der Länder und der EU“ des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie verwendet (<http://www.foerderdatenbank.de/>). Zusätzlich wird geprüft, ob darüber hinaus relevante UFOPLAN-Vorhaben sowie Vorhaben aus dem Förderprogramm r³ zu identifizieren sind, die durch die Recherche in der Förderdatenbank nicht erfasst wurden.

Auf EU-Ebene erfolgt die Recherche über CORDIS, den Forschungs- und Entwicklungsinformationsdienst der Europäischen Kommission. Über den Webaufritt (http://cordis.europa.eu/projects/home_de.html) sind Projektdaten laufender und abgeschlossener Forschungsvorhaben bis ins Jahr 1990 zurückreichend verfügbar.

Die anhand der beiden Datenbanken als relevant identifizierten Forschungsvorhaben sind in Anhang C2 aufgeführt.

Die Betrachtung der identifizierten Forschungsvorhaben zeigt keinen klaren inhaltlichen Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten. Zu den in mehreren Projekten bearbeitenden Themen zählen

- ▶ Optimierung von Gussverfahren, insbesondere Al-Guss;
- ▶ Verzinkung von Stahlwerkstoffen;
- ▶ Oberflächenbehandlung und Beschichtung;

- ▶ Aufbereitung und Verwertung von Schlacken und Stäuben;
- ▶ Recycling von Batterien und Elektronikschrott;
- ▶ Erwärmung von Aluminiumbolzen;
- ▶ Verfahrensoptimierungen in der Aluminiumbandproduktion;
- ▶ Optimierung der Al-Primärherstellung (u.a. Prozessmodellierung; verbesserte Ofengeometrien).

Daneben gibt es eine Reihe von Themen, die zumindest in einem der identifizierten Vorhaben betrachtet werden. Hierunter fallen:

- ▶ Recycling von verzinkten Produkten,
- ▶ Recycling von Aluminium-Sonderwerkstoffen (Aluminiumschäume, Sonderlegierungen und weitere),
- ▶ Schließung von Kreisläufen in der Kupfermetallurgie,
- ▶ Prozessoptimierungen an verschiedenen Stellen der Halbzeugherstellung (u.a. Beschichtung von Kupferdrähten, Entfettung laufender Al-Folien)
- ▶ Wassermanagement in der verarbeitenden Industrie.

2.2.8.1 Vorhaben DeteRes

Nicht erfasst wurde innerhalb der zuvor beschriebenen Datenbankabfragen das Vorhaben „Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz“ („DeteRes; UFOPLAN FKZ 3712 93 321), welches in Abstimmung mit dem Auftraggeber an dieser Stelle ebenfalls kurz betrachtet wird. In DeteRes wird untersucht, inwieweit Pfadabhängigkeiten, Trajektorien und technische Schranken die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität der Bundesrepublik bestimmen und in welchen Maße sie einer Dematerialisierungspolitik in den kommenden Jahrzehnten Grenzen setzen können. Das Projekt ist im Juni 2013 gestartet, (Zwischen-) Ergebnisse sind bisher nicht öffentlich verfügbar. Die Materialauswahl des Projekts beinhaltet neben metallischen Rohstoffen (hier werden Eisen/Stahl, Kupfer, Aluminium und Gold betrachtet) mineralische Rohstoffe (Sand/Kies, Kalk, Naturstein), Energierohstoffe (Kohle, Öl, Gas) und biogene Rohstoffe (Holz, Nahrungsmittel). Somit werden von den hier relevanten NE-Metallen zwar nur Aluminium und Kupfer betrachtet; im weiteren Verlauf des Projektes gewonnene Erkenntnisse können aber durchaus eine Relevanz für DelphiNE aufweisen und werden – soweit rechtzeitig verfügbar – in der Thesenbildung für die Delphi-Befragung berücksichtigt.

2.2.8.2 Fördermaßnahme r²

Zu den zuvor identifizierten Forschungsvorhaben zählen mehrere Projekte aus der Fördermaßnahme r³ des Bundesministeriums für Forschung und Bildung. Den Vorgänger von r³ stellt die Fördermaßnahme r² dar, in deren Rahmen von 2009 bis 2013 22 Projekte mit 55 Millionen Euro gefördert wurden. Da die Datenbankabfrage auf laufende Vorhaben abzielt, finden sich r²-Projekte nicht unter den Ergebnissen. Ziel der Maßnahme „r²- Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – rohstoffintensive Produktionsprozesse“ war es, Ansätze zur intelligenteren und effizienteren Nutzung von Rohstoffen in der Metall- und Stahlindustrie sowie der Chemie-, Keramik- und Baustoffindustrie zu entwickeln. Die Ergebnisse der r²-Vorhaben sind in Woidasky et al. (2013) zusammengefasst, die Projekte mit Bezug zur NE-Metallindustrie sind in Anhang C2 aufgeführt. Die Vorhaben befassen sich mit folgenden Aspekten:

- ▶ Rückgewinnung feinkörniger NE-Metallphasen aus Shreddersanden;
- ▶ Metallrückgewinnung aus WEEE-Schrotten;
- ▶ Analyse von Sekundärrohstoffen;
- ▶ Gewinnung von Wertmetallen aus Kupferschiefer-Halden;
- ▶ Senkung des Primärenergieverbrauchs in der Bleimetallurgie;

- ▶ Entzinkung von Stahlschrotten;
- ▶ Verzinkung;
- ▶ Schlackenverwertung und -aufbereitung.

2.3 Rahmenbedingungen

2.3.1 Rolle der NE-Metallindustrie in der deutschen Wirtschaft

Die deutsche NE-Metallindustrie kann als eine der größten und gleichzeitig effizientesten der Welt betrachtet werden (BGR 2012). Sie ist mit anderen Wirtschaftszweigen eng verzahnt, so dass sich Beeinträchtigungen der NE-Metallbranche direkt auf andere Wirtschaftszweige sowie insbesondere die Exportfähigkeit der deutschen Wirtschaft auswirken (BGR 2012).

In 2011 waren in der deutschen NE-Metallindustrie in 656 Betrieben 106.624 Menschen beschäftigt. Der Gesamtumsatz belief sich auf 54,7 Mrd. Euro (WVM 2013).

2.3.2 Bedarfsentwicklungen

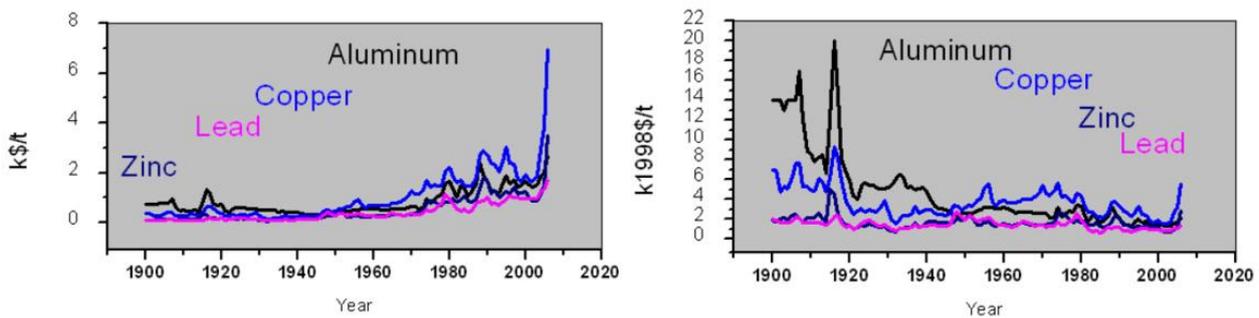
Auf globaler Ebene kann China als Treiber der Rohstoffnachfrage gesehen werden, was sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in den nächsten Jahren fortsetzen wird. Aufgrund der industriellen Entwicklung und des Infrastrukturausbaus in Schwellenländern (einschließlich China) ist langfristig von dauerhaft von absolut hohen Nachfragen nach energie- und mineralischen Rohstoffen auszugehen (BGR 2012). Aufgrund der Entwicklung von Zukunftstechnologien (bspw. Windkraft, Elektromobilität) sind zukünftig häufiger unvorhergesehene Nachfrageschübe nach einzelnen Metallen zu erwarten (BGR 2012), eine besondere Relevanz für Aluminium, Kupfer, Blei und Zink besteht hierbei jedoch nicht unbedingt. Zwar wird beispielsweise für Kupfer für die nächsten 20 Jahre der größte relative Mengenzuwachs im Bedarf bei industriellen Elektromotoren und Fahrzeugen mit alternativen Antrieben (Brennstoffzellen, Hybrid- und Elektroautos) sowie dem Ausbau von Übertragungsnetzen erwartet (DERA 2013). Eine besondere Beeinflussung der Kupfernachfragesituation insgesamt lässt sich hierbei jedoch nicht feststellen (siehe Angerer et al. 2010). Auch Untersuchungen für den Windenergieausbau in Deutschland (Zimmermann et al. 2013) zeigen keine herausragende Bedeutung für die Bedarfsentwicklung insgesamt.

2.3.3 Versorgungssituation

2.3.3.1 Preisentwicklung

Die Preise von NE-Metallen weisen mitunter saisonal starke Schwankungen auf. Beispielsweise sanken die Preise von Kupfer (-17 %), Blei (-16 %) und Aluminium (-14 %) im Dezember 2011 im Vergleich zum Vorjahr deutlich, der Zinkpreis stieg im selben Zeitraum um 1,5 % (BGR 2012). Zum Jahresbeginn 2012 war wiederum eine allgemeine Steigerung der Preise festzustellen, die aber bereits ab Februar 2012 wieder nachließ. Mittelfristig wird ein eher konstantes bis sinkendes Preisniveau erwartet (BGR 2012). Die Preisschwankungen stehen in engem Zusammenhang mit der Entwicklung der Weltkonjunktur. Daneben sind Beeinflussungen durch Spekulation sowie unvorhergesehene Nachfrageimpulse durch neue Technologien möglich, was aber eher für sogenannte kritische oder strategische Metalle („Technologiemetalle“ wie die Seltenen Erden, Indium, Gallium, Germanium) relevant ist, als für die hier betrachteten Aluminium, Kupfer, Zink und Blei. Auch wenn die langfristigen Preisentwicklungen auf den ersten Blick deutliche Steigerungen in den vergangenen beiden Jahrzehnten nahelegen (siehe Abbildung 16), so ist dies bei Betrachtung der inflationsbereinigten Preisentwicklung nicht festzustellen.

Abbildung 16: Preisentwicklungen von Aluminium, Kupfer, Blei und Zink ab 1900



Links: Preisentwicklung nicht bereinigt; Rechts: inflationsbereinigte Preisentwicklung

Quelle: Papp et al. 2008 (U.S. Geological Survey)

2.3.3.2 Versorgungskapazitäten

Für die vier betrachteten Metalle (und NE-Metalle insgesamt) ist aufgrund von diversen Explorationsvorhaben und Projektentwicklungen mittelfristig von einem Wachstum der Abbaukapazitäten auszugehen; besondere Explorationserfolge sind u.a. in Kanada, Mexico, Westafrika und Australien festzustellen (BGR 2012). Für Bauxit wird aufgrund des Kapazitätsausbaus insbesondere in Guinea, China, Australien, Indonesien und Sierra Leone ein weiteres Wachstum bis mindestens 2017 erwartet (Menzie et al. 2013). Bezüglich des Abbaus von Kupfererz sind Kapazitätserweiterungen in Kongo, Australien und Chile zu erwarten (Menzie et al. 2013).

2.3.4 Kritikalität

Erdmann und Behrendt (2011) haben eine Identifizierung kritischer Rohstoffe für Deutschland vorgenommen, wie sie bspw. auch bereits für die EU (European Commission 2010), die USA (American Physical Society 2011; National Research Council 2007) oder den Freistaat Bayern (Reller 2009) durchgeführt wurden. Anhand der zwei Dimensionen der Rohstoffkritikalität, Versorgungsrisiko (Risiko für eine Unterbrechung der sicheren, wirtschaftlichen und umweltverträglichen Versorgung der Wirtschaft mit Rohstoffen) und Vulnerabilität (potentielles Ausmaß der Schädigung der Wirtschaft bei auftretenden Störungen der Versorgung mit Rohstoffen), ist eine Bewertung u.a. der vier Fokus-NE-Metalle dieser Studie, Aluminium, Blei, Kupfer und Zink, hinsichtlich ihrer Kritikalität erfolgt. Keines der vier Metalle wurde hierbei in die Zone der hohen oder höchsten Kritikalität eingeordnet. Kupfer und Zink wurden in die Zone mit mittlerer Kritikalität eingestuft, was einem mittleren Versorgungsrisiko bei mittlerer Vulnerabilität entspricht. Für Aluminium wurde ein geringes Versorgungsrisiko bei hoher Vulnerabilität festgestellt, während Blei mit einem geringen Versorgungsrisiko und geringer Vulnerabilität nur eine insgesamt geringe Kritikalität aufweist (Erdmann und Behrendt 2011). Zu einem vergleichbaren Ergebnis kam eine von Erdmann und Graedel (2011) durchgeführte Review Studie, in der zehn Kritikalitätsstudien mit unterschiedlichen geographischen Bezugsräumen ausgewertet und verglichen wurden. In keiner der betrachteten Studien wurden hier Kupfer, Zink und Blei als kritisch bewertet, Aluminium wurde in lediglich einer Studie als kritisch bewertet.

Eine deutlich höhere Kritikalität als die vier Fokusmetalle weisen hingegen deren Nebenprodukte wie Gallium, Indium, Germanium oder Silber auf. So findet sich Germanium bei Erdmann und Behrendt (2011) in der Zone höchster Kritikalität (sehr hohes Versorgungsrisiko, sehr hohe Vulnerabilität), Gallium, Indium und Silber finden sich in der Zone hoher Kritikalität (hohes Versorgungsrisiko, hohe Kritikalität). Da insbesondere Gallium, Indium und Germanium ausschließlich als Nebenprodukte gewonnen werden, führt eine Verknappung dieser Metalle im Gegensatz zu den Trägermetallen nicht zu einer Erweiterung der Produktion. Gleichzeitig findet bei diesen Metallen praktisch kein EOL-Recycling statt (Graedel et al. 2011), was erheblich zum hohen Versorgungsrisiko beiträgt. Ein großer Teil dieser Metalle dissipiert entlang des Produktlebenszyklus und geht dem Kreislauf auf eine Weise verloren,

die ein Recycling unter derzeitigen technischen und wirtschaftlichen Bedingungen praktisch ausschließt (Zimmermann und Gößling-Reisemann 2013; Zimmermann 2016; Zimmermann 2015).

2.4 Vorgelagerte Systeme

Unter die vorgelagerten Technologien fallen wie unter 2.1 beschrieben solche Technologien, die für Erzabbau und Aufkonzentrierung bzw. Konzentraterzeugung eingesetzt werden. Für die Durchführung der Delphi-Befragung, deren Schwerpunkt auf Akteuren aus Deutschland liegt, wird die Bedeutung der vorgelagerten Technologien als nachrangig eingestuft.

Auch wenn der Abbau und die Konzentraterzeugung außerhalb der Systemgrenzen der Studie verortet ist, ist jedoch zu erwähnen, dass sich bei den meisten Metallen sinkende Erzgehalte feststellen lassen. Somit ergeben sich steigende Umweltwirkungen in Abbau und Konzentraterzeugung bezogen auf das enthaltene Metall, soweit diese nicht durch Verbesserungen in den Prozessen ausgeglichen werden (Mudd 2007; 2010). Daneben können mit der Abnahme der Erzqualität und der Verarbeitung komplexerer Erze Verunreinigungen im Konzentrat durch beispielsweise Arsen oder Quecksilber zunehmen (Mudd 2007; 2010). Hierdurch können sich Auswirkungen für die weitere Verarbeitung in Deutschland ergeben (Langner 2013). So müssen beispielsweise zu hohe Arsengehalte in Kupferkonzentraten unter Umständen vor der weiteren Behandlung in konventionellen Anlagen durch Rösten oder hydro-metallurgische Behandlung reduziert werden (Ruiz et al. 2013). Norgate et al. (2007) beschreiben jedoch, dass sich auch bei sinkender Erzqualität für die sich der Konzentratherstellung anschließenden Prozesse keine insgesamt signifikant erhöhten Emissionen erkennen lassen.

2.5 Nachgelagerte Systeme

Unter den Punkt der nachgelagerten Systeme des Technologiekomplexes werden im Projektzusammenhang wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, Änderungen von Marktanforderungen mit einem direkten technologischen Bezug gefasst, aus denen sich Konsequenzen für die Prozesse der Metallgewinnung und -verarbeitung ergeben, wie beispielsweise Forderungen nach höheren Reinheiten der Metalle.

Dafür, dass die NE-Metallindustrie solchen sich ändernden Marktanforderungen ausgesetzt ist, konnten jedoch keine Indizien gefunden werden. Auf allgemeine Änderungen der Bedarfssituation wurde bereits in Abschnitt 2.3.2 eingegangen.

2.6 Zusammenfassung

2.6.1 Ressourcenschonungspotenziale und Forschungstrends

Die zentralen Ergebnisse der durchgeführten Analyse sind in Tabelle 29 zusammengefasst.

Tabelle 29: Ausgewählte Ergebnisse der Analyse

Methodischer Schritt	Zentrale Ergebnisse
Bibliometrische Analyse	<p>Über die Zeit Zunahme der Forschungsaktivitäten bzgl. Ressourcenschonungspotenzialen in der NE-Metallindustrie insgesamt sowie Verbreiterung der untersuchten Bereiche.</p> <p>Aktuell lässt sich eine besondere Relevanz der Untersuchung von Aufbereitung und Verwertung von Schlacken, Stäuben und Schlämmen feststellen.</p> <p>Optimierungen des EOL-Managements (inklusive Prozesse zum Recycling) zeigen sich konstant als relevantes Forschungsfeld.</p> <p>Ab 2000 relevante Veröffentlichungsaktivitäten zu Optimierungen in den Bereichen Gießerei- bzw. Gussverfahren sowie der Verhüttung bzw. von Hoch- und Schmelzöfen.</p>

Erweiterten Suche

Bezüglich Energieverbrauchs kommt der Aluminiumverhüttung („smelting“; Hall-Heroult Prozess) eine herausragende Bedeutung verglichen mit den anderen Fokusmetallen zu.

Die hydrometallurgische Kupfergewinnung zeigt einen etwa um den Faktor zwei höheren Energieverbrauch als die pyrometallurgische Gewinnung.

Verglichen mit dem theoretischen minimalen Energiebedarf bestehen bei der Aluminiumgewinnung große Potenziale in der Raffination zur Gewinnung von Aluminiumoxid (Bayer-Prozess).

Hohe relative Potenziale (verglichen mit minimalem Energieaufwand) auch im Aluminiumguss bzw. -gießverfahren.

Nur geringe Optimierungspotenziale in der Anodenproduktion.

Verbesserungspotenziale bei allen Fokusmetallen durch verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien möglich.

Verbesserungen in der EOL-Situation aller betrachteten Fokusmetalle durch verbessertes recyclinggerechtes Design möglich.

Verbesserungspotenziale im Bereich der Ver- und Entzinkung.

Großes Potenzial in der Optimierung von Schmelzöfen sowie deren Steuerung. Neuen und optimierten Brennersystemen sowie dem Einsatz regenerativer Befeuerung kommt hierbei eine wichtige Rolle zu.

Zukünftige können sich durch Verunreinigung von Erzen bzw. Abnahme der Erzqualität zusätzlicher Anforderungen an die weitere Bearbeitung in Deutschland ergeben.

Betrachtung komplexer Technologien

Insgesamt große Potenziale durch Ansätze zur Wärmerückgewinnung bei allen Fokusmetallen.

- Ansätze zur Wärmerückgewinnung umfassen interne und externe Nutzung von Abwärme sowie Stromerzeugung durch ORC-Anlagen.
- Größtes Abwärmepotenzial bei Aluminium in der Elektrolyse.

Große Potenziale durch Steigerung der Wärmeeffizienz

- Effizienzsteigerung durch Prozesssteuerung.
- Verbesserte Wärmeisolation.
- Modernere Anlagen.

Insgesamt noch viel Potenzial durch verbessertes Energiemanagement:

- Nutzung eigener, dezentraler und erneuerbarer Energieerzeugung.
- Verbesserte Prozesssteuerung/ Optimierung von Prozessparametern.
- Energierückgewinnung an diversen Stellen entlang der Prozesskette.
- Optimierte Lastmanagement (Demand-Side-Management) in der NE-Metallindustrie kann zur verbesserten Integration erneuerbarer Energien beitragen.

Mangelhafte Gebäude- und Fabrikplanung kann zu deutlich gesteigertem Energieverbrauch beitragen.

Moderne Gebäudegestaltung kann deutliche Energieeinsparungen in Heizung und Lüftung ermöglichen.

Betrachtung von FuE Vorhaben

Keine klaren Schwerpunkte.

Mind. zwei Vorhaben zu folgenden Themengebieten:

- Optimierung von Gussverfahren.

- Verzinkung von Stahlwerkstoffen.
- Oberflächenbehandlung und Beschichtung.
- Aufbereitung und Verwertung von Schlacken und Stäuben.
- Recycling von Batterien und Elektronikschrotten.
- Erwärmung von Aluminiumbolzen.
- Verfahrensoptimierungen in der Aluminiumbandproduktion.

2.6.2 Thesen

Die Erkenntnisse der Ist-Analyse werden im Folgenden zu Thesenentwürfen zusammengefasst, die im Anschluss zum Fragen zur Delphi-Befragung weiterentwickelt werden. Sie haben nur einen vorläufigen Charakter und stellen den Ausgangspunkt für die Entwicklung des Fragebogens dar.

Die auf Grundlage der Ist-Analyse entworfenen Thesen sind dabei entsprechend der Struktur des Technologiekomplexes zu verstehen. Die Thesen sind nicht als reine Zusammenfassung aufzufassen, sondern greifen auch solche Aspekte auf, die im Rahmen der Ist-Analyse nicht eindeutig belegt werden konnten.

2.6.2.1 Untersuchte Technologien / Prozesskette (inkl. komplementäre Technologien):

- ▶ Bezüglich der Optimierung der Aufbereitung und Verwertung von Schlacken, Stäuben und Schlämmen besteht großes Potenzial.
- ▶ Bezüglich der Optimierung von Gießerei- bzw. Gussverfahren besteht großes Potenzial.
- ▶ Bezüglich der Optimierung von Hoch- und Schmelzöfen (Design sowie Prozesssteuerung) besteht großes Potenzial.
- ▶ Optimierte Brennersysteme können einen deutlichen Beitrag zur Effizienzsteigerung beitragen. Hierzu zählt auch der Einsatz erneuerbarer Brennstoffe.
- ▶ Bezüglich der Optimierung von Walzverfahren sowie der Werkstückvorerwärmung bestehen große Potenziale.
- ▶ Bezüglich des EOL-Managements (Sammlung, Sortierung sowie Verfahren zum Recycling) bestehen bei allen Fokusmetallen weiterhin Verbesserungsmöglichkeiten.
- ▶ Es bestehen große Potenziale in der Optimierung von Verzinkungsverfahren.
- ▶ Es bestehen große Potenziale in der Entzinkung/ Rückgewinnung von Zink aus verzinkten Bauteilen.
- ▶ Es bestehen große Optimierungsmöglichkeiten an verschiedenen Punkten der Prozessketten durch Wärmerückgewinnung.
- ▶ Größere Effizienzgewinne durch Optimierung durch Wärmerückgewinnung als durch eigentliche Prozessoptimierung möglich.
- ▶ Abwärmenutzung zu Stromerzeugung weist ein großes Ressourcenschonungspotenzial auf.
- ▶ Abwärmenutzung als Wärmequelle weist ein großes Ressourcenschonungspotenzial auf.
- ▶ Ansätze zur Wärmerückgewinnung werden häufig nicht umgesetzt wegen zu langer Amortisationszeiten.
- ▶ Ansätze zur Wärmerückgewinnung werden häufig nicht umgesetzt wegen fehlendem Kapital.
- ▶ Ansätze zur Wärmerückgewinnung werden häufig nicht umgesetzt wegen fehlenden Informationen.
- ▶ Eine Installation eigener dezentraler erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen findet häufig nicht statt wegen zu langer Amortisationszeiten.
- ▶ Eine Installation eigener dezentraler erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen findet häufig nicht statt wegen fehlendem Kapital.

- ▶ Eine Installation eigener dezentraler erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen findet häufig nicht statt wegen fehlenden Informationen.
- ▶ Es besteht prinzipiell ein großes Potenzial zur Emissionsreduzierung in der NE-Metallindustrie durch verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien.
- ▶ Die hydrometallurgische Route ist von wachsender Bedeutung in der Kupfergewinnung (sinkender Anteil der pyrometallurgischen Route). (Die hydrometallurgische Route weist u.a. geringeren Energieaufwand und niedrigere Kosten auf.)
- ▶ Die elektrolytische Raffination zeigt eine sinkende Bedeutung in der Bleigewinnung zu Gunsten der pyrometallurgischen Raffination.
- ▶ Hydrometallurgischer Verfahren zeigen eine wachsende Bedeutung in der Zinkgewinnung; pyrometallurgischer Verfahren eine sinkende Bedeutung (u.a. wegen ihres hohen Energieaufwands und niedrigerer Effizienz).
- ▶ Durch optimierte Fabrik- und Gebäudeplanung sind signifikante Effizienzgewinne möglich.
- ▶ Die Entwicklung inerter Anoden hat ein enormes Potenzial zur CO₂-Einsparung in der Aluminiumherstellung.

2.6.2.2 Rahmenbedingungen

- ▶ Die Versorgung mit NE-Metallen kann mittelfristig als sicher angesehen werden.
- ▶ Die Versorgung mit NE-Metallen kann langfristig als sicher angesehen werden.
- ▶ Mittelfristig ist von konstanten Preisen für NE-Metalle auszugehen.
- ▶ Langfristig ist von konstanten Preisen für NE-Metalle auszugehen.
- ▶ Dauerhaft hohe absolute Nachfragen nach NE-Metallen (insbesondere durch hohe Nachfrage aus China und Schwellenländern) erfordert verstärktes Engagement bzgl. Energie- und Ressourceneffizienz.
- ▶ Preisschwankungen erschweren zukünftig verstärkt die Investition in Maßnahmen zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz (Planungsunsicherheiten).
- ▶ Langfristig sinkende Preise (verbesserte Versorgungssituation durch Wachstum der Abbaukapazitäten) reduzieren die Attraktivität von Investitionen in Maßnahmen zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz.

2.6.2.3 Vorgelagerte Systeme

- ▶ Durch Verschlechterungen der Erzqualität sind zusätzliche Anforderungen an die weitere Bearbeitung in Deutschland zu erwarten. Hierzu zählt insbesondere die Verunreinigung der Konzentrate.

2.6.2.4 Nachgelagerte Systeme

- ▶ Es sind keine Änderungen der Marktanforderungen zu erwarten, aus denen sich Konsequenzen für die Prozesse der Metallgewinnung und -verarbeitung ergeben (bspw. Forderungen nach höheren Reinheiten der Produkte).

2.6.3 Akteure

Die Erfassung der Akteure ist parallel zur Durchführung der Ist-Analyse erfolgt. Neben den Akteuren, die im Rahmen der durchgeführten Analysen identifiziert wurden, wurden weitere Akteure anhand folgender Maßnahmen identifiziert:

- ▶ Anhand der Hoppenstedt Hochschuldatenbank wurden Betriebe der Herstellung und Verarbeitung der vier Fokusmetalle erfasst.
- ▶ Die Initiative Metalle pro Klima, deren Webauftritt bereits im Rahmen der Analyse herangezogen wurde, wurde auf ihre Mitgliedsinstitutionen hin überprüft.

- ▶ Die Webauftritte der Verbände (Wirtschaftsvereinigung Metalle, GDA, Deutsches Kupferinstitut) wurden auf relevante Institutionen untersucht.

Die Akteure sind im Folgenden nach den Bereichen Forschung/Wissenschaft, Behörden, Verbände/NGOs und Industrie gegliedert. Im Bereich der Forschung/Wissenschaft erfolgt eine weitere Unterscheidung zwischen universitären Institutionen und privaten oder unabhängigen Forschungsinstituten und Beratungsfirmen. Die in diesem Bereich identifizierten Akteure finden sich in Tabelle 30. Akteure aus dem Bereich der Behörden sowie Verbänden/ NGOs sind gemeinsam in Tabelle 31 dargestellt. Akteure aus dem Bereich der Industrie finden sich in Tabelle 32. Für die hier aufgeführten Betriebe ist zusätzlich dargestellt, welche Metalle hergestellt, verarbeitet bzw. recycelt werden.

Tabelle 30: Akteure aus Forschung und Beratung

Universitäre Forschung	Private/ unabhängige Forschung und Beratung
Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling (IME), RWTH Aachen	Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB), RWTH Aachen	INTECUS
Gießerei-Institut (GI), RWTH Aachen	Ökopol
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Braunschweig	Fraunhofer IFAM
Universität Bremen, Institut für Mikrosensoren, -aktoren und -systeme	Fraunhofer Umsicht
Universität Bremen, Lehrstuhl für Schweißtechnische und verwandte Verfahren	Ökoinstitut e.V.
Universität Bremen, Institut für Werkstofftechnik	Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH
Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (IFAD), TU Clausthal	
Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen, TU Darmstadt	
Institut für Nichteisen-Metallurgie und Reinstoff, TU Bergakademie Freiberg	
Institut für Werkstoffkunde, Universität Hannover	
Fachgebiet Sustainable Engineering, TU Berlin	

Tabelle 31: Akteure aus Behörden sowie Verbänden und NGOs

Behörden	Verbände/ NGOs
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU bzw. BMU b) Umweltbundesamt Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Deutsche Rohstoffagentur (DERA) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)	Wirtschaftsvereinigung Metalle Deutsches Kupferinstitut Gesamtverband der Aluminiumindustrie Gesamtverband der Deutschen Buntmetallindustrie Fachvereinigung Edelmetalle IG Metall Arbeitgeberverband Gesamtmetall Initiative Metalle pro Klima Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) International Copper Association European Copper Institute Verein Deutscher Ingenieure (VDI) VDMA International Lead and Zinc Study Group International Copper Study Group International Aluminium Institute

Tabelle 32: Akteure aus der Industrie

Akteur	Aluminium	Kupfer	Blei	Zink	Herstellung (H) / Verarbeitung (V) / Recycling (R)
Johnson Controls Recycling GmbH	-	-	-	-	R
Befesa Zinc Duisburg GmbH	-	-	-	x	V
Hydro (Norsk Hydro ASA; Hydro Aluminium Deutschland GmbH; Hydro Aluminium Rolled Products GmbH)	x	-	-	-	H,V,R
Novelis Deutschland GmbH	x	-	-	-	V,R
TRIMET Aluminium SE	x	-	-	-	H,V,R
Aleris Rolled Products Germany GmbH	x	-	-	-	H
Constellium Singen GmbH	x	-	-	-	V
Grillo-Werke AG	-	-	-	x	V,R
Aleris Recycling (German Works) GmbH	x	-	-	-	R
Aluminium Norf GmbH	x	-	-	-	H
alu druckguss GmbH & Co. Brandenburg KG	x	-	-	-	V

Aurubis AG	-	x	-	-	H,V,R
Berzelius Stolberg GmbH	-	-	x	-	H
Berzelius Metall GmbH	-	-	x	-	H,R
Weser Metall GmbH	-	-	x	-	R
Schwermetall Halbzeugwerk GmbH & Co. KG	-	X	-	-	H,V
Nordenhamer Zinkhütte GmbH	-	-	-	x	H
BSB Recycling GmbH	-	-	X	-	R
Feinhütte Halsbrücke GmbH	-	-	x	X	H,R
Raguse + Voss Metallgießerei GmbH	X	X	x	X	V
Metallwerke Dinslaken GmbH & Co. KG	-	-	-	x	H,R
MKM Mansfelder Kupfer und Messing GmbH	-	x	-	-	H,V
Aurubis Stolber GmbH & Co. KG	-	x	-	-	V
KME Brass Germany GmbH/ KME German AG & Co. KG	-	x	-	-	V
Gebr. Kemper GmbH & Co. KG	-	x	-	X	H,V
Schwering & Hasse Elektronik GmbH	-	x	-	-	V
LEONI Draht GmbH	-	x	-	-	V
ECKA Granules Germany GmbH	-	x	x	x	H
Wieland-Werke Aktiengesellschaft	-	x	-	-	H
Outokumpu Nirosta GmbH	-	-	-	-	H Stahlproduktion
ThyssenKrupp Rasselstein GmbH	-	-	-	-	H Weißblechproduktion
H.C. Starck GmbH	-	-	-	-	H,V Funktionsmetalle
Rheinzink GmbH & Co. KG	-	-	-	X	H,V
Diehl Metall Stiftung & Co. KG	-	X	-	-	H,V
Otto Fuchs KG	X	X	-	-	H,V
Recyclex GmbH	-	-	x	x	R
Voerde Aluminium GmbH	X	-	-	-	H
Voigt & Schweitzer GmbH & Co. KG	-	-	-	X	V
WIEGEL Verwaltung GmbH & Co. KG/ WIEGEL Gruppe	-	-	-	X	V
F.W. Brökelmann Aluminiumwerk GmbH & Co. KG	X	-	-	-	H,V

Martinrea Honsel Germany GmbH	x	-	-	-	V
lebronze alloys Germany GmbH	-	x	x	x	V
Siegener Verzinkerei Holding GmbH	-	-	-	x	V
Berkenhoff GmbH	-	x	-	x	V
Brueckmann GmbH & Co. KG	-		-		Schraubenfabrik
Chemet GmbH	-	x		x	V
KSL Kupferschiefer Lausitz GmbH	-	x	-	-	H
mittelrheinische Metallgießerei Heinrich Beyer GmbH & Co. KG	x	x	x	-	H
Saar Metallwerke GmbH	-	x	-	-	H
AFM aluminiumfolie merseburg GmbH	x	-	-	-	V
Albéa	x	-	-	-	V
Alcoa Extrusions Hannover	x	-	-	-	V
Aleris Extruded Products Germany GmbH	x	-	-	-	V
Aluminium Oxid Stade	X	-	-	-	H
Aluminiumwerke Wutöschingen AG & Co. KG	x	-	-	-	V
Aluminiumwerke Unna AG	x	-	-	-	V
AMAG casting GmbH	x	-	-	-	H
AMAG rolling GmbH	x	-	-	-	V
BAGR Berliner Aluminiumwerk GmbH	x	-	-	-	H,R
Ball Aerocan	x	-	-	-	V
Borbet GmbH	x	-	-	-	V
Drahtwerk Elisenthal W. Erdmann GmbH & Co.	x	-	-	-	V
Erbslöh Aluminium GmbH	X	-	-	-	V
Essel Deutschland GmbH & Co. KG	x	-	-	-	V
GRIMM Metallpulver GmbH	x	-	-	-	V
Gutmann AG / Gutmann Aluminium Draht GmbH	x	-	-	-	V
interfer Aluminium GmbH	x	-	-	-	V
Muldenhütten Recycling und Umwelttechnik GmbH (MRU)	-	-	x	-	R

x = Metall wird abgedeckt; - = Metall wird nicht abgedeckt

3 Konzeption der Delphi-Befragung

Auf Basis der im Rahmen der Ist-Analyse generierten Thesen (Forschungs- und Entwicklungstrends in der Nichteisen (NE)- Metallindustrie) erfolgt die Erarbeitung des Fragebogens für die Delphi-Befragung. Ergänzend wird im Rahmen eines Workshops und in Form von Interviews Expertenwissen eingebunden. Beide Ansätze (Ist-Analyse und Experteneinbindung) werden dabei weitgehend getrennt voneinander verfolgt. Die Erkenntnisse aus der Ist-Analyse werden nur in Auszügen zur Kommunikation mit den Experten verwendet. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass das Expertenwissen weitgehend unbeeinflusst abgefragt werden kann. Weitere grundsätzliche Vorgaben zum Vorgehen ergeben sich aus der Methodik zur Delphi-Befragung. Diese wird in Abschnitt 3.1 kurz dargestellt.

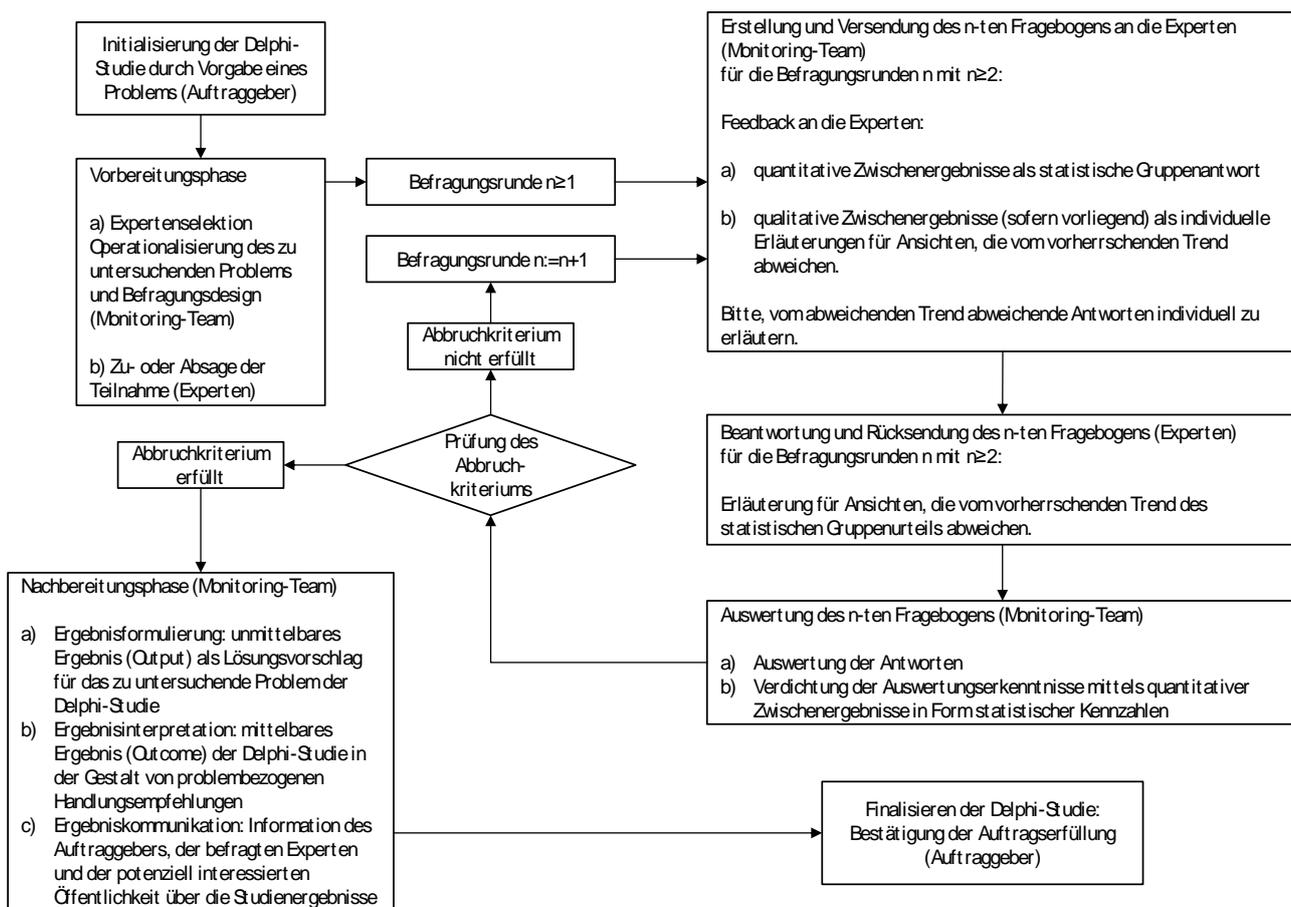
Neben den verschiedenen sprachlichen und inhaltlichen Entscheidungen und Designaspekten ist in der Konzeptionsphase der Delphi-Befragung der Teilnehmerkreis zu fixieren. Der Grundstock des Teilnehmerkreises speist sich u.a. aus den Teilnehmern des Expertenworkshops und deren Empfehlungen. Durch weitergehende umfassende und systematische zusätzliche Recherchen wird dieser Kreis - wie in Abschnitt 3.6 beschrieben - sukzessive erweitert.

3.1 Delphi-Methode

Abbildung 17 stellt übersichtsartig und schematisch das Vorgehen zur Delphi-Befragung nach Zelewski und Münchow-Küster (2012) dar:

- ▶ An die Initialisierung der Studie zum Start
- ▶ schließt sich eine Vorbereitungsphase an, die u.a. die Konzeption der Befragung mit Entwicklung des Fragebogens und Festlegung des Teilnehmerkreises beinhaltet.
- ▶ Der Konzeptions- bzw. Vorbereitungsphase schließt sich die eigentliche Befragung an.

Abbildung 17: Vorgehensschema zur Delphi-Befragung



Quelle: nach Zelewski & Münchow-Küster 2012: 68

Die zu treffenden methodischen Entscheidungen beziehen sich auf die Entwicklung des Fragebogens sowie die Erarbeitung der Liste mit potenziellen Teilnehmern der Delphi-Befragung. In der folgenden tabellarischen Übersicht werden die grundlegenden methodischen Entscheidungen zur Durchführung der Befragung zusammengefasst.

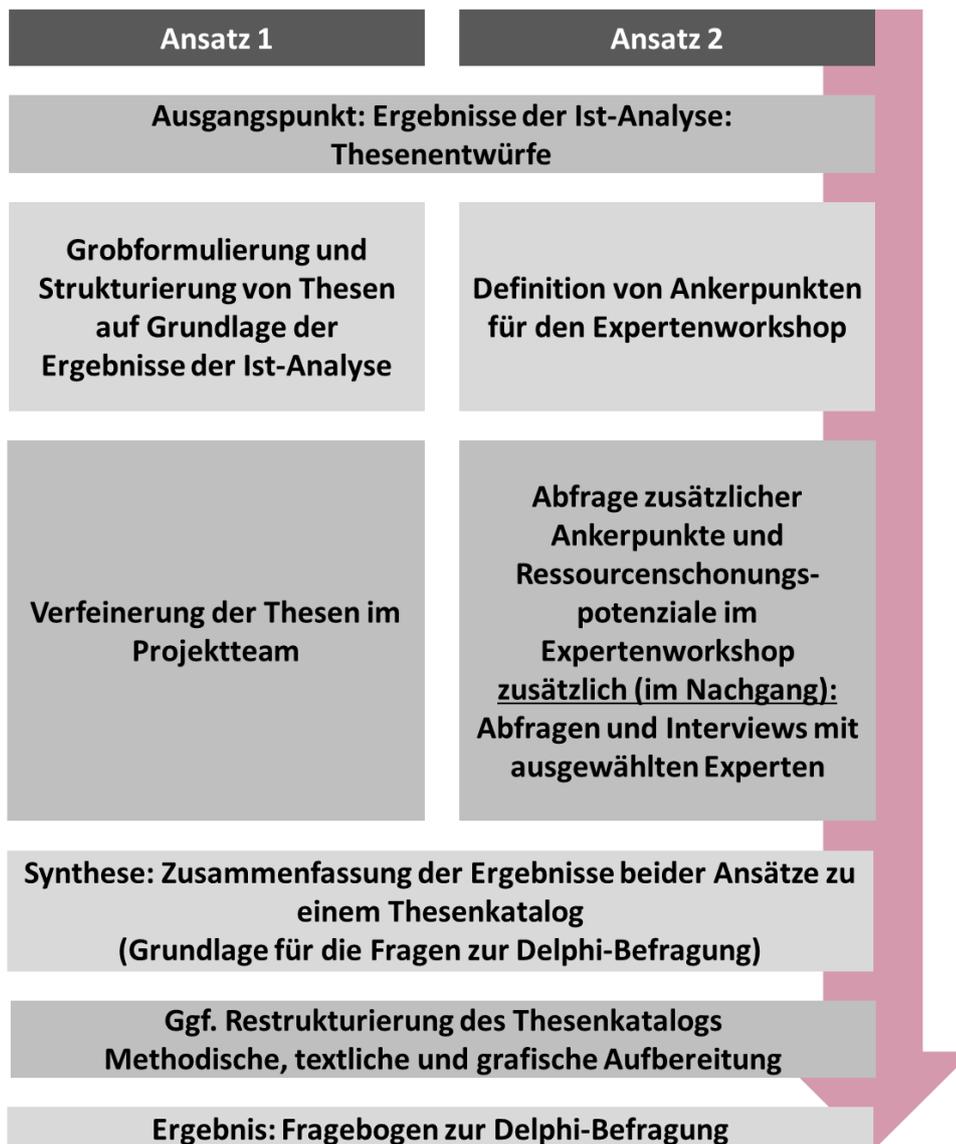
Tabelle 33: Methodische Festlegungen Delphi-Befragung

Methodische Frage	Festlegung für DelphiNE
Anzahl und Art der Kriterien für Auswahl der Experten mit mutmaßlicher Expertise für das zu untersuchende Problem	Eine Anzahl von 200+ Experten wird angestrebt. Die Auswahl erfolgt anhand der Ist-Analyse sowie über Empfehlungen der „Kernexperten“ (Workshopteilnehmer) → „Pyramiding“, ferner über systematische zusätzliche Recherchen
Art der Einladung der Experten, verknüpft damit, ob und welche Anreize für Experten geboten werden	Kommunikation auf verschiedenen Wegen: Email, Telefonate, persönliche Gespräche
Medium der schriftlichen Befragung (klassisch vs. online)	Online, Durchführung mit Lime Survey

3.2 Vorgehen zur Erarbeitung des Fragebogens

Zur Erarbeitung des Fragebogens werden zwei Ansätze verfolgt, deren gemeinsames Ergebnis ein konsolidierter Thesenkatalog darstellt, der im Anschluss nach einer methodischen, textlichen und grafischen Aufbereitung in den Fragebogen zur Delphi-Befragung überführt wird. Eine Übersicht über die beiden Ansätze findet sich in Abbildung 18.

Abbildung 18: Vorgehen zur Erarbeitung des Fragebogens



In Ansatz 1 erfolgt zunächst eine Grobformulierung von Thesenentwürfen auf Grundlage der Ergebnisse der Ist-Analyse. Zusätzlich werden in der Leistungsbeschreibung zum Projekt genannte Aspekte zur Befragung berücksichtigt. Die auf dieser Basis formulierten Thesen werden anschließend in Anlehnung an den im Rahmen der Ist-Analyse formulierten Technologiekomplex strukturiert (vgl. Abbildung 19). Im nächsten Schritt werden die Thesenentwürfe in mehreren Schleifen innerhalb des Projektteams verfeinert.

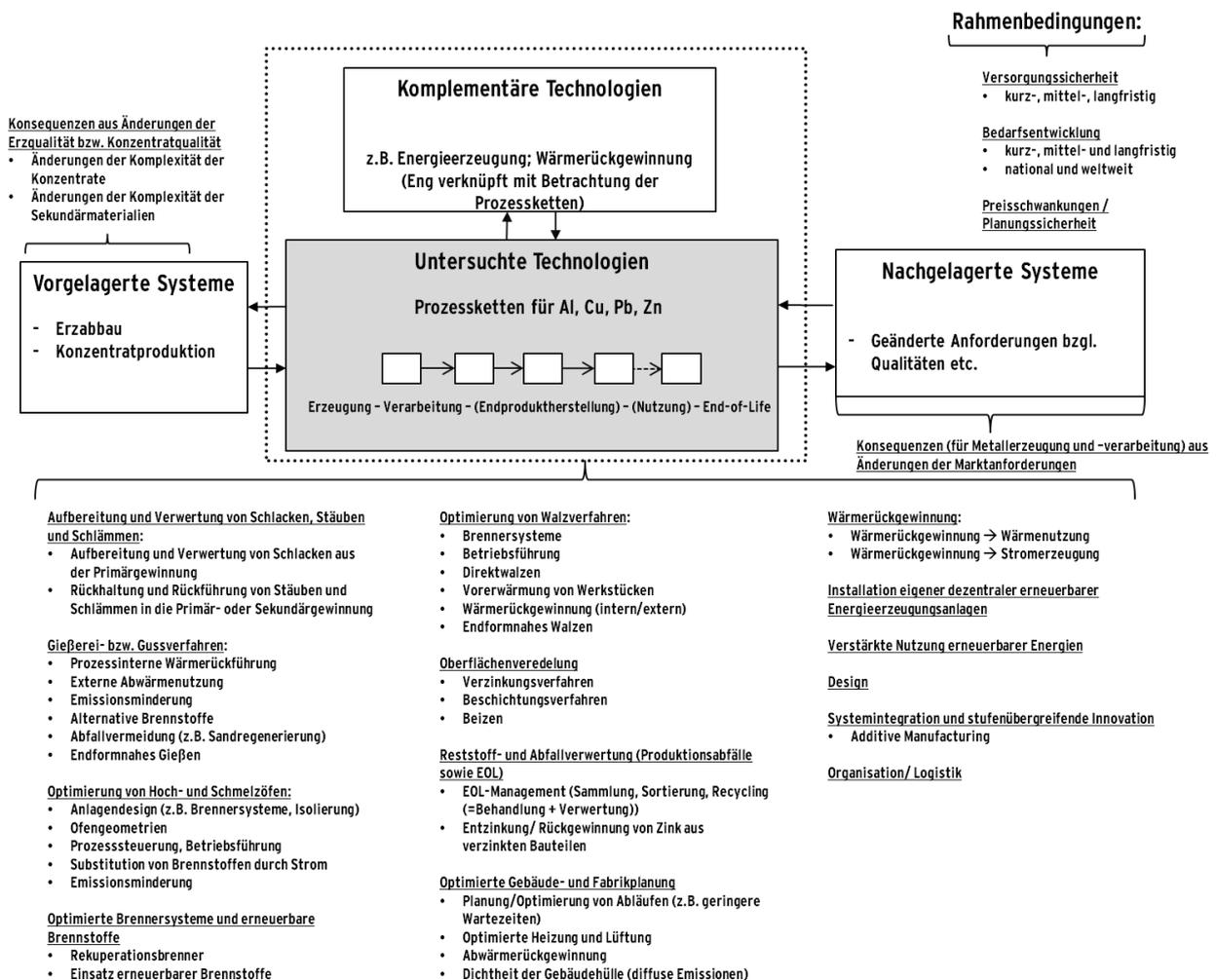
Für Ansatz 2, die Einbindung von Expertenwissen durch den Expertenworkshop, werden zunächst zwar ebenfalls die Ergebnisse der Ist-Analyse herangezogen. Diese dienen hier jedoch nur dafür, kon-

krete Bereiche im Technologiekomplex zu identifizieren, die bei den Experten nach eventuellen Maßnahmen zur Ressourcenschonung abgefragt werden. Diese „Ankerpunkte“ des Technologiekomplexes wurden im Expertenworkshop in einem ersten Schritt durch die Experten ergänzt und im Nachgang nach potenziellen Maßnahmen zur Ressourcenschonung abgefragt. Das (Zwischen-)Ergebnis stellt einen Katalog mit nach dem Technologiekomplex strukturierten Thesen bzw. Maßnahmen dar. Dieser Katalog wurde wiederum Experten aus der Wissenschaft zur Ergänzung und Kommentierung vorgelegt.

Auf den durchgeführten Expertenworkshop wird detaillierter in Abschnitt 3.3 eingegangen, auf die im Nachgang durchgeführten Schritte zur Finalisierung des Thesenkatalog in Abschnitt 3.4. Die weiteren Schritte zur Überführung des Thesenkatalogs in den fertigen Fragebogen sind in Abschnitt 3.5 beschrieben.

Parallel zu diesen Schritten erfolgte die Sammlung und Akquirierung relevanter Experten für die Delphi-Befragung. Auf die einzelnen Schritte wird in Abschnitt 3.6 eingegangen. Von Relevanz sind dabei jeweils auch die getroffenen methodischen Grundsatzentscheidungen (siehe Tabelle 33).

Abbildung 19: Technologiekomplex –Zentrale Elemente und Ankerpunkte



3.3 Anmerkungen zum Expertenworkshop

Der Expertenworkshop fand am Mittwoch, 02.07.2014, von 10:00-16:00 Uhr in Räumlichkeiten des BMUB in Bonn statt. Die 17 Workshopteilnehmer umfassten Vertreter der Produktion und Verarbeitung der vier Fokusmetalle, das heißt Vertreter von Aluminium-, Kupfer-, Blei- und Zinkindustrie, Industrieverbände, Recyclingunternehmen, Wissenschaft und Behörden.

Zielsetzung des Workshops war die Erarbeitung von Ressourcenschonungspotenzialen in der NE-Metallindustrie mit einem potenziellen zukünftigen Beitrag zur Erreichung der Ziele der Green Economy.

Die Dokumentation der Ergebnisse des Expertenworkshops findet sich im Anhang in Abschnitt 0.

Abbildung 20: Impressionen aus dem Expertenworkshop



3.4 Finalisierung des Thesenkatalogs

Die nach Ansatz 1 und 2 erarbeiteten Thesen wurden in einen konsolidierten Thesenkatalog überführt, Redundanzen wurden dabei beseitigt. Die Thesen wurden dabei zum großen Teil in eine Form überführt, die sich nach folgendem Muster beschreiben lässt:

Maßnahme + Potenzial + Zeithorizont der Realisierbarkeit

Dies stellt sich beispielsweise so dar:

Optimierte Rückhaltung und Rückführung von Stäuben und Schlämmen in die Primär- oder Sekundärge- winnung

P (Potenzial): niedrig bis mittel

T (Zeitliche Realisierbarkeit): bis 2025

Die Potenziale und zeitliche Realisierbarkeit wurden zum Teil bereits im Expertenworkshop erfasst. Beim Großteil der Thesen sind hier jedoch noch Lücken offen geblieben.

Dieser Thesenkatalog wurde einer Reihe von wissenschaftlichen Experten zur Kommentierung und Ergänzung vorgelegt. Dabei wurden auch für einige Maßnahmen Einschätzungen bzgl. Potenzial und zeitlicher Realisierbarkeit ergänzt.

3.5 Überführung in Fragebogen

Der erarbeitete Thesenkatalog bildet die wesentliche Grundlage für den Fragebogen zur Delphi-Befragung. Bei der Überführung in den Fragebogen ist jedoch eine Reihe zusätzlicher Überlegungen zu beachten.

So ist beim Aufbau und bei der Struktur des Fragebogens darauf zu achten, dass eine möglichst hohe Rücklaufquote erreicht wird. Dabei sind folgende für Delphi-Befragungen typische handwerkliche Punkte von Relevanz (vgl. Zelewski und Münchow-Küster 2012):

- ▶ Der Fragebogen richtet sich ausschließlich an Experten; es kann hierbei davon ausgegangen werden, dass die Experten über Expertise verfügen.
- ▶ Es kann angenommen werden, dass die befragten Experten mit wissenschaftlichen Befragungen vertraut sind und in der Lage sind, einen Fragebogen auszufüllen.
- ▶ Die Befragung erfolgt online, d.h. an einem elektronischen Eingabegerät (Desktop-PC, Notebook, Smartphone etc.), und die Befragten füllen den Fragebogen ohne Unterstützung des Interviewers bzw. des Projektteams aus.
- ▶ Die Struktur des Fragebogens soll übersichtlich und nachvollziehbar sein.
- ▶ Die Experten sollen einleitend über Inhalt und Struktur des Fragebogens informiert werden.
- ▶ Die Fragen sollen nicht zufällig angeordnet, sondern zur Erhöhung der Übersichtlichkeit zu Themenkomplexen gebündelt werden.
- ▶ Fragen zur Person des Experten sollen nicht direkt zu Beginn der Befragung gestellt werden, da dies den Anreiz zur weiteren Beantwortung mindern kann.

Bei der konkreten Formulierung der Fragen ist ferner insbesondere auf die Verwendung einfacher Worte, die möglichst konkrete Formulierung der Frage sowie die Vermeidung einer Überforderung der Experten durch Abfrage objektiven Wissens zu achten.

Es lassen sich verschiedene grundsätzliche Fragetypen unterscheiden, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile aufweisen (vgl. Zelewski und Münchow-Küster 2012):

- ▶ Offene Fragen: Bspw. Freitextfelder räumen ein breites Spektrum an Antwortmöglichkeiten ein und erlauben Antworten, die bei der Konzeption nicht in Betracht gezogen wurden. Nachteilig ist jedoch der deutlich erhöhte Aufwand bei der Beantwortung und Auswertung.
- ▶ Geschlossene Fragen: Die Antwortmöglichkeiten sind explizit vorgegeben, bspw. „Ja“, „Nein“ und „Weiß nicht“. Dies erlaubt eine schnelle Beantwortung und Auswertung, jedoch keine elaborierte Meinungsäußerung.
- ▶ Halboffene Fragen: Kombination aus offener und geschlossener Frage. Neben vorgegebenen Antwortmöglichkeiten können eigene Antworten formuliert werden.

Für die Delphi-Befragung in DelphiNE werden in erster Linie geschlossene Fragen verwendet. Angesichts der anvisierten hohen Gesamtzahl an Fachfragen soll auf diese Weise sichergestellt werden, dass sich der zeitliche Aufwand zur Beantwortung in einem vertretbaren Rahmen hält. Zusätzlich wird jedoch die Möglichkeit gegeben, in Freitextfeldern Anmerkungen oder Hinweise zu den gestellten geschlossenen Fragen zu geben, die dann in der zweiten Befragungsrunde ggf. berücksichtigt werden können. Abgefragt werden hier in erster Linie Maßnahmen, die potenziell zur Ressourcenschonung bzw. zur Erreichung der Ziele der Green Economy beitragen können. Diese Maßnahmen werden strukturiert nach den Bereichen „NE-Metallindustrie allgemein“, „Aluminium“, „Kupfer“, „Blei“ und „Zink“ sowie den betreffenden Ankerpunkten des Technologiekomplexes abgefragt und sind von den Experten bezüglich ihres Potenzials auf einer dreistufigen Skala niedrig – mittel – hoch sowie bzgl. ihrer zeitlichen Realisierbarkeit von: bis 2020 realisierbar – bis 2025 realisierbar – bis 2030 realisierbar – erst später realisierbar – zu bewerten. In den Freitextfeldern ist es den Teilnehmern zudem möglich, bei Bedarf auf vorhandene rechtliche, ökonomische, technologische etc. Hindernisse hinzuweisen, was ebenfalls in der zweiten Befragungsrunde aufgegriffen werden kann.

Neben diesen inhaltlichen Fragen finden sich zu Beginn des Fragebogens Fragen zur Selbsteinstufung der Expertise, gegliedert nach den Metallen sowie den Ankerpunkten des Technologiekomplexes sowie zur Identifizierung der Experten, die in Delphi-Studien u.a. dazu dienen, um bspw. mögliche Ursachen für divergierende Expertenurteile auszumachen. Hierbei erfolgt eine Unterteilung in folgende Stakeholdergruppen:

- ▶ Wissenschaft
- ▶ Wirtschaft
- ▶ Verbände
- ▶ NGOs
- ▶ Politik/ Behörden

Der vollständige Fragebogen findet sich im Anhang in Abschnitt 0. Dieser Fragebogen beinhaltet bereits die Überarbeitungen, die sich aus der Durchführung eines Pre-Tests (vgl. Abschnitt 4.1.2), in dem der Fragebogen einem Kernteam von Experten zum Test vorgelegt und die Möglichkeit zur Rückmeldung gegeben wird, ergeben haben.

3.6 Identifizierung von Experten als Teilnehmer

Die Auswahl der Experten zur Teilnahme an der Delphi-Befragung ist einer der wichtigsten Schritte in der Durchführung einer Delphi-Befragung (vgl. Zelewski und Münchow-Küster 2012). Die Qualität der Studienergebnisse hängt in großem Maße vom sogenannten „fit“ (d.h. der Übereinstimmung) zwischen dem zu untersuchenden Problem und den an der Befragung teilnehmenden Experten ab.

Prinzipiell gilt hier, einen guten „fit“ durch die Auswahl der Experten mit einem hohem Ausmaß an Expertise, also an Fachwissen und handlungsbefähigender Kompetenz im Bereich des untersuchten Problems (sog. „echte Experten“), zu erreichen. Expertise versteht sich in diesem Zusammenhang als Konstrukt mit zwei Wissensbestandteilen:

1. Deklaratives Fachwissen in einem Realitätsausschnitt, erkennbar über Indikatoren wie Branchentätigkeit (Praktiker), Fachgebiet (Wissenschaftler)
2. Prozedurales Handlungswissen (Kompetenz, Fachwissen problemlösungsbezogen und wirksam einsetzen zu können), erkennbar über o.g. Indikatoren sowie Patente (Praktiker und Wissenschaftler)

Gleichzeitig kann jedoch auch eine Beimischung sogenannter „Querdenker“ oder „Außenseiter“ mit geringerer problembezogener Expertise, die jedoch vom vorherrschenden Mainstream unabhängige Impulse geben können, zum erfolgreichen Abschluss der Befragung beitragen (vgl. Zelewski und Münchow-Küster 2012).

Das planmäßige und systematische Vorgehen zur Identifizierung von Experten konzentriert sich auf so genannte „echte Experten“, wobei in Kauf genommen wird, dass sich, da die angewandten Kriterien nicht exakt und trennscharf sind, auch Minder-Experten in den Teilnehmerkreis aufgenommen werden können.

Für die Größenordnung des zur Teilnahme an der Delphi-Befragung einzuladenden Personenkreis wurde eine Größe von >300 Experten anvisiert. Diese Größe wird zum einen als ausreichend eingeschätzt, um im Verlaufe der Befragung auftretenden „Schwund“ (Abnahme der Teilnehmerzahlen über die beiden Befragungsrunden) aufzufangen. Zudem lassen sich eventuelle individuelle Beurteilungsfehler durch ein größeres Expertenpanel eher ausgleichen. Zum anderen sollte in dieser Größenordnung eine ausreichende Breite an Experten vertreten sein, so dass zum inhaltlich differenzierten Fragebogen für alle Fragenbereiche ausreichend Expertise aufgefangen werden kann. Hierbei sollen die unterschiedlichen Stakeholdergruppen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik vertreten sein. Auf eine Gleichverteilung zwischen diesen Gruppen wie teilweise in der Literatur beschrieben, wird jedoch verzichtet.

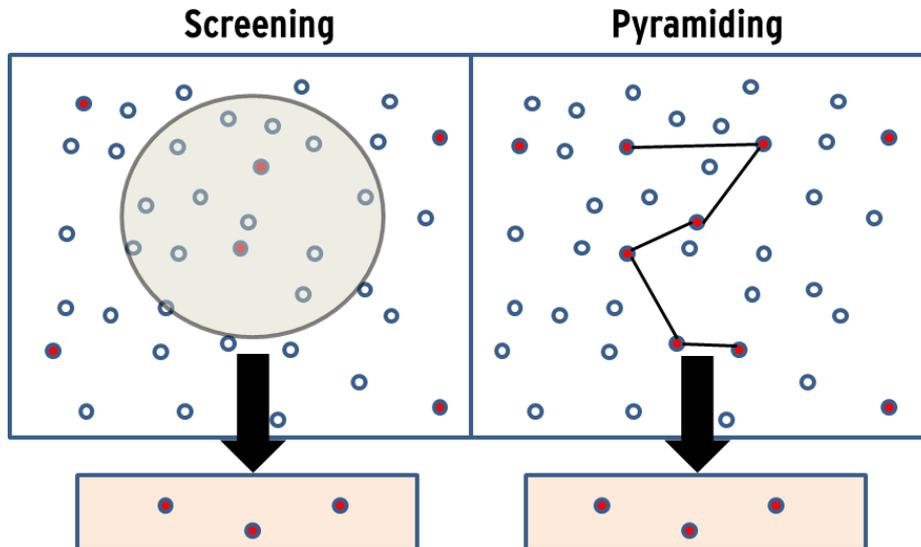
Für die Identifizierung des Expertenpanels als Stichprobe der Grundgesamtheit (=Personen mit genügender Expertise zur NE-Metallindustrie, um sich mit Ressourcenschonungspotenzialen glaubwürdig auseinander setzen zu können) werden folgende Kriterien herangezogen:

- ▶ Experten aktiv im deutschsprachigen Raum und
- ▶ mindestens ein Indikator zur Expertise in der NE-Metallindustrie ist erfüllt:
 - Personen, die in vergangenen 10 Jahren in führenden wissenschaftlich-orientierten Zeitschriften zur NE-Metallindustrie am häufigsten publiziert haben oder von Dritten am häufigsten zitiert wurden;
 - Mitglieder wissenschaftlicher Kommissionen oder für die NE-Metallindustrie relevanter wissenschaftlicher Zusammenschlüsse;
 - Personen, die in vergangenen 10 Jahren am häufigsten als Redner oder Keynote Speaker auf bedeutenden Konferenzen, Kongressen, Tagungen und Workshops mit Bezug zur NE-Metallindustrie im deutschsprachigen Raum aufgetreten sind;
 - Inhaber von Lehrstühlen/Professuren an Hochschulen im deutschsprachigen Raum;
 - Personen, die in den vergangenen 10 Jahren in Praxiszeitschriften, Online-Newslettern etc. im Kontext der NE-Metallindustrie am häufigsten erwähnt wurden;
 - Personen, die in führenden kleinen, mittleren oder großen Unternehmen im Bereich der NE-Metallindustrie angehören und mutmaßlich über fundiertes Erfahrungswissen in der NE-Metallindustrie verfügen;
 - Personen, die einem Ministerium vorstehen, das in enger inhaltlicher Verbindung mit der NE-Metallindustrie steht;
 - Mitglieder politischer Ausschüsse im deutschen Bundestag, in den Landesparlamenten oder in der EU, die in enger inhaltlicher Verbindung mit der NE-Metallindustrie stehen.

Das konkrete methodische Vorgehen zur Identifizierung von Experten anhand dieser Kriterien stellt sich als Kombination eines Top-down- und Bottom-up-Vorgehens dar. Beim Bottom-up-Ansatz wird anhand des so genannten Pyramiding vorgegangen. Der Begriff stammt aus dem Innovationsmanagement und wurde insb. von Hippel et al. (1999) geprägt. Die Grundidee hierbei ist, dass Personen mit bestimmtem Interesse und spezifischer Expertise in der Regel „Gleichgesinnte“ kennen, bei denen die betreffen-

den Eigenschaften noch ausgeprägter sind; d.h. es findet ein systematisches „Netzwerken“ durch Weiterempfehlungen statt. Die Effizienz des Such- und Identifikationsverfahrens hat Prügl (2006) in empirischen Analysen untersucht.

Abbildung 21: Vorgehen beim Pyramiding



Quelle: nach Reichwald und Piller 2009

Das Vorgehen nach dem Top-down Ansatz stützt sich auf folgende Quellen zur Expertenidentifizierung:

- ▶ Wissenschaftliche Publikationen;
- ▶ Wissenschaftlicher Kommissionen und akademische Fachgemeinschaften (Analyse der Mitgliederdatenbank, -verzeichnisse);
- ▶ Lehrstühle/ Professuren an Hochschulen;
- ▶ Experten in Unternehmen;
- ▶ Redner auf Konferenzen, Tagungen, Kongressen, etc.;
- ▶ Politiker und Mitglieder von Ausschüssen.

Im Einzelnen wurden hierbei die in Tabelle 34 aufgeführten Quellen und Institutionen betrachtet bzw. bei der vertiefenden Internetrecherche herangezogen.

Tabelle 34: Quellen zur Identifizierung des Teilnehmerkreises zur Delphi-Befragung

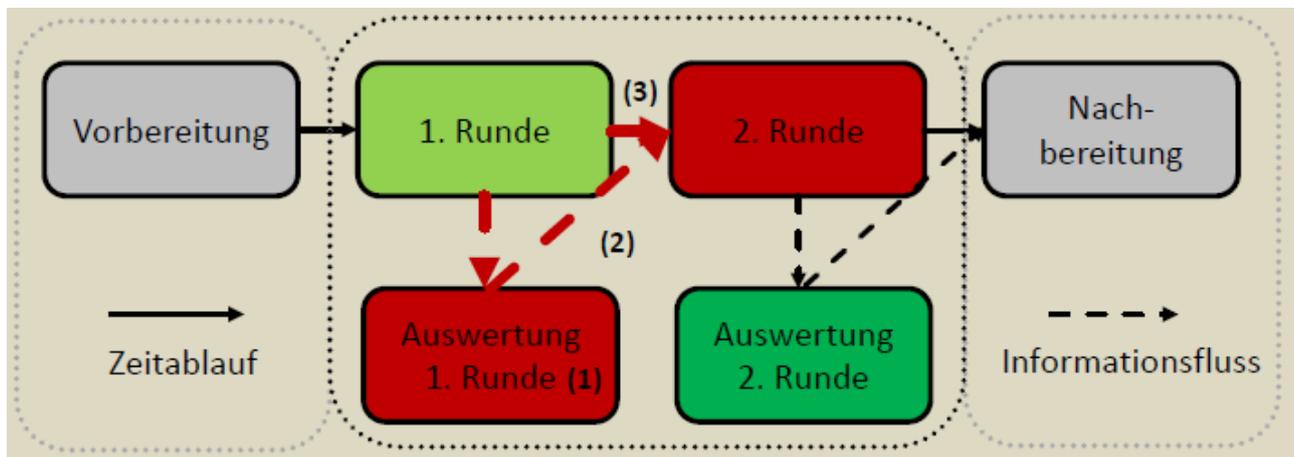
Zugang	Mögliche Ergebnisse
<p>Vorarbeiten aus AP1</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Deutschsprachige Autoren der in der bibliometrischen Analyse betrachteten Veröffentlichungen. • Für die NE-Metallindustrie identifizierte relevante Institutionen (Unternehmen, Verbände, NGOs, Forschungseinrichtungen). • Beteiligte der betrachteten Forschungsprojekte. • Beteiligte der betrachteten Best-Practice Beispiele.
<p>Konferenzen, Tagungen und Kongresse</p>	<ul style="list-style-type: none"> • European Metallurgical Conference • Lead-Zinc-Congress Pb-Zn • Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz • Euro LightMAT 2013 – Leichtbautrends der Zukunft: Magnesium, Aluminium, Titan und ihre Legierungen • Schlacken aus der Metallurgie – Chancen für Wirtschaft und Umwelt • Urban Mining Congress • Jahrestagung „Aufbereitung und Recycling“ in Freiberg • 4. BDI- Rohstoffkongress • Tagung „Hochtechnologiemetalle – Motor für Innovation“ 2011 • BGR Rohstoffkonferenz 2013 • European Mineral Resources Conference (EUMICON) 2012 • European Aluminium Congress (EAC) 2013 • Aluminium 2014 Conference • Europäische Rohstoffkonferenz 2012 • 2nd European Resources-Forum 2014, 2. Nationales Ressourcen-Forum • EUROFORUM-Konferenz: Technologiemetalle – im Spannungsfeld von Nachfrageboom und Versorgungsengpässen • Jahrestagung „Kupfersymposium 2014“ • REWIMET-Symposium 2013 • Infotag „Strategische Rohstoffe aus Aschen und Schlacken“ • IFAT

Die anhand dieser Quellen bzw. der darauf aufbauenden Internetrecherche identifizierten Personen wurden anhand der oben aufgeführten Kriterien auf ihren Expertenstatus geprüft.

4 Durchführung der Delphi-Befragung

Die Durchführung der Delphi-Befragung erfolgt in zwei Befragungsrunden. Abbildung 22 gibt eine Übersicht über das Vorgehen zur Befragung. Die Grundlage der ersten Befragungsrunde bildet der entwickelte Fragebogen (Schritt „Vorbereitung“ in der Abbildung).

Abbildung 22: Vorgehensmodell zur Delphi-Befragung



rot: aktueller Fokus; grün: bevorstehender Fokus

(1), (2) und (3) kennzeichnen die drei Hauptaufgaben beim Übergang zwischen erster und zweiter Befragungsrunde

Der entwickelte Fragebogen wird hierfür zunächst in das Befragungstool (lime survey) implementiert. Im Anschluss erfolgen ausführliche Pre-Test-Runden zur finalen Prüfung, bevor die eigentliche Befragung startet.

An die erste Befragungsrunde schließt sich eine Auswertung an, in der die abgegebenen Einschätzungen der Experten analysiert und in geeigneter Weise in quantitativer und qualitativer Hinsicht ausgewertet werden. Auf Basis der ausgewerteten und aufbereiteten Ergebnisse der ersten Befragungsrunde wird der Fragebogen für die zweite Befragungsrunde entwickelt (Abbildung 22, rote Hervorhebung). Insofern stehen beim Übergang von der ersten zur zweiten Befragungsrunde drei Hauptaufgaben im Fokus:

- ▶ **Auswertung und Verdichtung:** Die Antworten aus der ersten Befragungsrunde werden ausgewertet und verdichtet. Maßnahmen bei denen sich bereits eine klare Tendenz zu einem niedrigen Potenzial zeigt, können hier von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden, Maßnahmen bei denen bereits Einigkeit bzgl. eines hohen Potenzials besteht, können direkt als Input für den Zukunftsworkshop übernommen werden.
- ▶ **Rückkopplung:** Die aufbereiteten Ergebnisse aus der ersten Befragungsrunde werden an die Experten rückgekoppelt.
- ▶ **Fragenkatalog für zweite Befragungsrunde:** Die Fragen für die zweite Befragungsrunde werden zusammengestellt und ausgewählt. Kern der Befragung stellen hierbei solche Fragen dar, bei denen sich in der ersten Befragungsrunde keine klare Tendenz gezeigt hat. An ausgewählten Stellen werden zudem Freitextfragen ergänzt.

Nach Abschluss der zweiten Befragungsrunde erfolgt deren Auswertung. Im Ergebnis sind die abgefragten Maßnahmen entweder von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen oder dienen als Input für den Zukunftsworkshop.

Die Durchführung der Delphi-Befragung erfolgt mit Hilfe des Online-Befragungstools *lime survey*.

4.1 Vorgehen und Methodik

4.1.1 Implementierung des Fragebogens ins Befragungstool

Den ersten Schritt des Arbeitspakets 3 stellt die Implementierung des Fragebogens ins Befragungstool *lime survey* dar. Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die Darstellung im Befragungstool.

Abbildung 23: Start-Bildschirm zur Delphi-Befragung

DelphiNE -1. Befragungsrunde

Delphi-Befragung im Rahmen des Projektes DelphiNE im Auftrag des Umweltbundesamtes.



DelphiNE
Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen in der NE-Metallindustrie durch eine Zukunftsanalyse nach der Delphi-Methode bis 2030

Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes
 (Förderkennzeichen 3713 93 306),
 durchgeführt vom Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung, Universität Bremen,
 aforetec GmbH, Bremen,
 Professur Nachhaltiges Zukunftsmanagement, Hochschule München

1. Befragungsrunde

Herzlich willkommen bei der Online-Befragung zum Forschungsprojekt DelphiNE!

Diese Umfrage enthält 63 Fragen.

Eine Bemerkung zum Datenschutz
 Dies ist eine anonyme Umfrage.
 In den Umfrageantworten werden keine persönlichen Informationen über Sie gespeichert, es sei denn, in einer Frage wird explizit danach gefragt. Wenn Sie für diese Umfrage einen Zugangsschlüssel benutzt haben, so können Sie sicher sein, dass der Zugangsschlüssel nicht zusammen mit den Daten abgespeichert wurde. Er wird in einer getrennten Datenbank aufbewahrt und nur aktualisiert, um zu speichern, ob Sie diese Umfrage abgeschlossen haben oder nicht. Es gibt keinen Weg, die Zugangsschlüssel mit den Umfrageergebnissen zusammenzuführen.

Zwischengespeicherte Umfrage laden
Weiter ▶
Umfrage verlassen und Antworten löschen

Abbildung 24: links: Struktur des Delphi-Fragebogens; rechts: Frage zur Identifizierung der Teilnehmer

Fragenindex
1. Hinweise
2. Einstufung der Expertise
3. Identifizierung
4. NE-Metalle - Rahmenbedingungen
5. NE-Metalle - Organisatorisch-konzeptionell..
6. NE-Metalle - Produktion
7. NE-Metalle - Aufbereitung & Verwertung v...
8. NE-Metalle - Gießerei- bzw. Gussverfahren
9. NE-Metalle - Optimierung von Hoch- & Sc...
10. NE-Metalle - Brennersysteme & erneuerb...
11. NE-Metalle - Walzverfahren
12. NE-Metalle - Reststoff- & Abfallverwertung
13. NE-Metalle - Gebäude- & Fabrikplanung
14. NE-Metalle - Organisation & Logistik
15. NE-Metalle - Wärmerückgewinnung
16. NE-Metalle - Energieversorgung & -erzeu...
17. NE-Metalle - Vorgelagerte Systeme
18. Aluminium - Elektrolyse
19. Aluminium - Produktion
20. Aluminium - Wärmerückgewinnung
21. Aluminium - Zusatzfragen
22. Kupfer - Reststoff- & Abfallverwertung
23. Kupfer - Zusatzfragen
24. Blei - Zusatzfragen
25. Zink - Zusatzfragen
26. 100-Mio. Euro Frage
27. Fragen zur Person
28. Abschließende Kommentare

Identifizierung

* Bitte ordnen Sie sich einem der folgenden Bereiche zu.
 Bitte wählen Sie eine der folgenden Antworten:

- Wissenschaft (Universitäten, Hochschulen, An-Institute etc.)
- Wissenschaft/ Beratung (private Forschungsinstitute, Beratungsfirmen, etc.)
- Wirtschaft/ Industrie
- Verbände
- NGOs
- Politik/ Behörden
- Sonstige

Bitte geben Sie hier Ihren Kommentar ein:

? Diese Frage dient ausschließlich Auswertungszwecken; die Beantwortung der Fragen erfolgt anonym.
 Bei Zuordnung zu Gruppe "Sonstige" würden wir Sie bitten im Kommentarfeld zu spezifizieren, in welchem Bereich Sie tätig sind.

Abbildung 25: Frage aus dem Fachteil; hier: Organisatorisch-konzeptionelle Entwicklungen

NE-Metalle - Organisatorisch-konzeptionelle Entwicklungen

Als organisatorisch-konzeptionelle Trends seien hier alle nicht-technologischen, aber gleichwohl betriebswirtschaftlich relevanten Entwicklungen verstanden, die ein Potenzial zur Ressourcenschonung bergen.

Was sind Ihrer Ansicht nach die wesentlichen organisatorisch-konzeptionellen Entwicklungen in der NE-Metallindustrie bis 2030 mit Relevanz zur Ressourcenschonung?
(bspw. neue Geschäftsmodelle, Kooperationsmöglichkeiten, Kunden-Lieferanten-Beziehungen, ...)

Bitte bewerten Sie folgende Maßnahmen aus dem Bereich organisatorisch-konzeptionelle Entwicklungen" bzgl. ihres Potenzials zu den Eingangs dargestellten Zielen der Green Economy (Vermeidung schädlicher Emissionen; Schließung von Stoffkreisläufen; Reduktion des Einsatzes nicht erneuerbarer Ressourcen; etc.) und nehmen Sie eine Einschätzung der zeitlichen Realisierbarkeit vor.

	Potenzial			Realisierbarkeit				keine Antwort
	niedrig	mittel	hoch	bis 2020	bis 2025	bis 2030	über 2030 hinaus	
Akzeptanz längerer Amortisationszeiten (>4 Jahre) um innovative Projekte umzusetzen.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>						
Zunahme der Bedeutung des Risiko- und Sicherheitsmanagement.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>						
Information/ Schulung des Personals in Hinblick auf Ressourcenschutz bzw. -effizienz (Relevanz des „eigenen Tuns“).	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>						
Know-how: Entwicklung von Lernmodulen zum Thema Ressourceneffizienz.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>						
Betriebliches Ideenmanagement stärken: Fokus Ressourceneffizienz.	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>						

4.1.2 Durchführung eines Pre-Tests

Vor dem eigentlichen Start der Befragung wurde ein Pre-Test in mehreren Runden durchgeführt. Pre-Tests dienen dazu, die Qualität eines Fragebogens durch die Reduzierung von Schwachstellen zu verbessern. Unter anderem soll hierbei in Erfahrung gebracht werden, ob (vgl. Zelewski und Münchow-Küster 2012):

- ▶ die Fragen verständlich sind und korrekt verstanden werden,
- ▶ weitere Hilfestellungen oder erklärende Textbausteine notwendig sind,
- ▶ der gewählte Frage- und Antwortmodus weiter operationalisiert werden muss,
- ▶ die Zeitdauer zur Befragung akzeptabel ist,
- ▶ technische Probleme bei der Beantwortung auftreten.

Es wurde ein dreistufiges Pre-Test-Verfahren gewählt:

1. Durchführung eines internen Pre-Tests mit Beteiligung der Auftragnehmer
2. Durchführung eines externen Pre-Tests mit Beteiligung der Auftragnehmer, der Auftraggeber sowie ausgewählten Experten
3. Durchführung eines finalen internen Pre-Tests (nur Auftragnehmer)

4.1.3 Einladung und Durchführung der ersten Befragungsrunde

Zur Teilnahme an der ersten Befragungsrunde der Delphi-Befragung wurden 342 Teilnehmer eingeladen. Als Einladungsmodus wurde die Einladung per Email gewählt sowie weitere Emails zur Erinnerung und eine telefonische Nachfassaktion.

Die Laufzeit der Befragung dauerte von 17.10.2014 bis 21.12.2014.

Als zeitlicher Aufwand für die vollständige Beantwortung der Befragung nannten die Experten im Pre-Test etwa 100 Minuten.

4.1.4 Ergebnisse und Auswertung der ersten Befragungsrunde

4.1.4.1 Teilnehmerstatistik

In der Betrachtung der Teilnehmerstruktur wird zwischen folgenden Größen differenziert (vgl. Zelewski und Münchow-Küster 2012):

- ▶ Gesamtbeteiligung: Gibt die absolute Anzahl der eingeladenen Experten an.
- ▶ Rücklaufquote: Verhältnis zwischen der Anzahl derjenigen Experten, die an der Befragung teilgenommen haben, und der Gesamtbeteiligung.
- ▶ Beendigungsquote: Verhältnis zwischen der Anzahl derjenigen Experten, die die Befragung vollständig abgeschlossen haben und den Fragebogen abgeschickt haben, und der Gesamtbeteiligung.

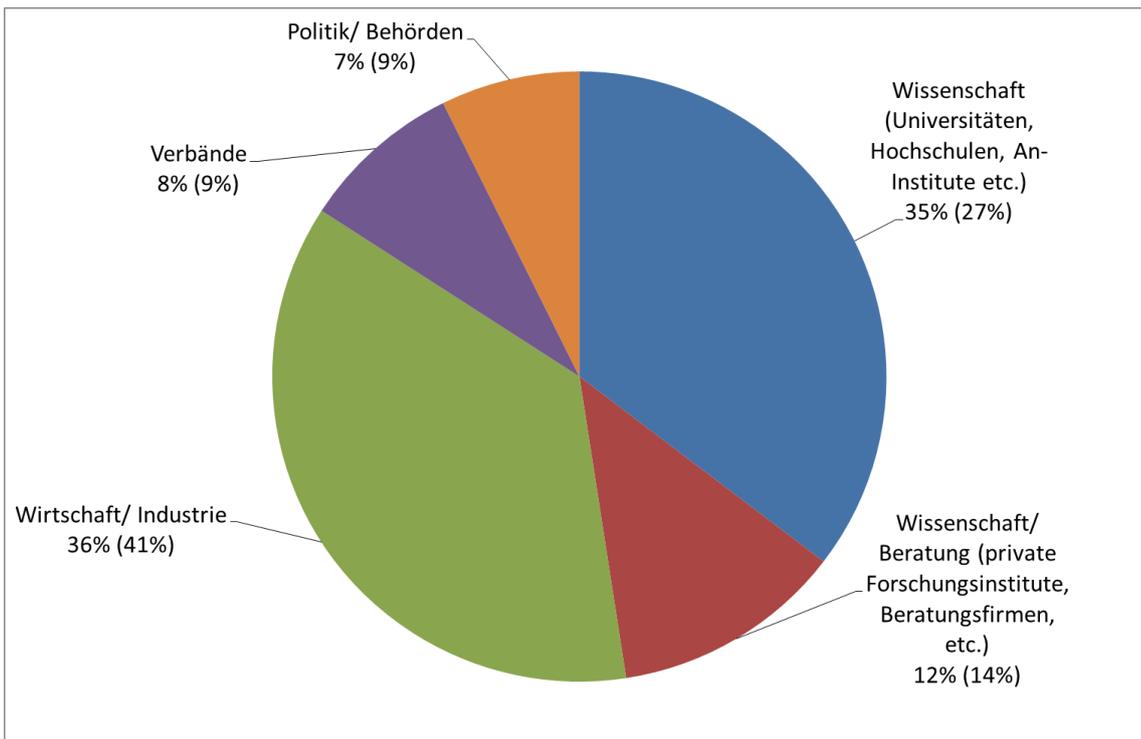
Diese Größen zur Teilnahmestatistik stellen sich wie folgt dar:

- ▶ Gesamtbeteiligung: 342
- ▶ Rücklaufquote: $165/342=48\%$
- ▶ Beendigungsquote: $82/342=24\%$

Das heißt, von den 165 Teilnehmern, welche die Befragung begonnen haben, hat rund die Hälfte den beantworteten Fragebogen abgeschickt. Diese Fragebögen stellen die Grundlage zur Auswertung dar. Die 83 unvollständig beantworteten Fragebögen wurden zunächst qualitativ geprüft. Hierbei wurde bei lediglich fünf Fragebögen ein differenziertes Antwortverhalten festgestellt. Die Fragebögen finden bei der qualitativen Prüfung der gefilterten Maßnahmen (siehe folgender Abschnitt) Berücksichtigung.

Die Teilnehmerstruktur der abgeschlossenen Fragebögen ist in Abbildung 26 dargestellt. Den größten Anteil macht die Wirtschaft bzw. Industrie mit 36 % aus, gefolgt von universitärer Forschung mit 35 %. Privatwirtschaftliche Wissenschaft und Beratung macht 12 % der Teilnehmer aus, Verbände 9 % und Politik bzw. Behörden 7 %. Es zeigt sich, dass bei der Struktur der Teilnehmer keine großen Abweichungen zur Struktur der eingeladenen Teilnehmer bestehen.

Abbildung 26: Teilnehmerstruktur der Delphi-Befragung, erste Befragungsrunde



Die Werte in Klammern geben den jeweiligen Anteil unter den eingeladenen Teilnehmern wieder.

Verschiedene Fragen zielten darauf ab, die Expertise der befragten Teilnehmer genauer zu untersuchen. Übergeordnet wurde die Erfahrung mit Fragen der Ressourcenschonung in der NE-Metallindustrie in Jahren abgefragt. Die relevanten Kennzahlen zu den gegebenen Antworten sind in Tabelle 35 zusammengefasst. Bei einer durchschnittlichen Erfahrung von rund 13 Jahren ergeben sich insgesamt rund 1.000 Jahre Erfahrung in der NE-Metallindustrie der Befragten.

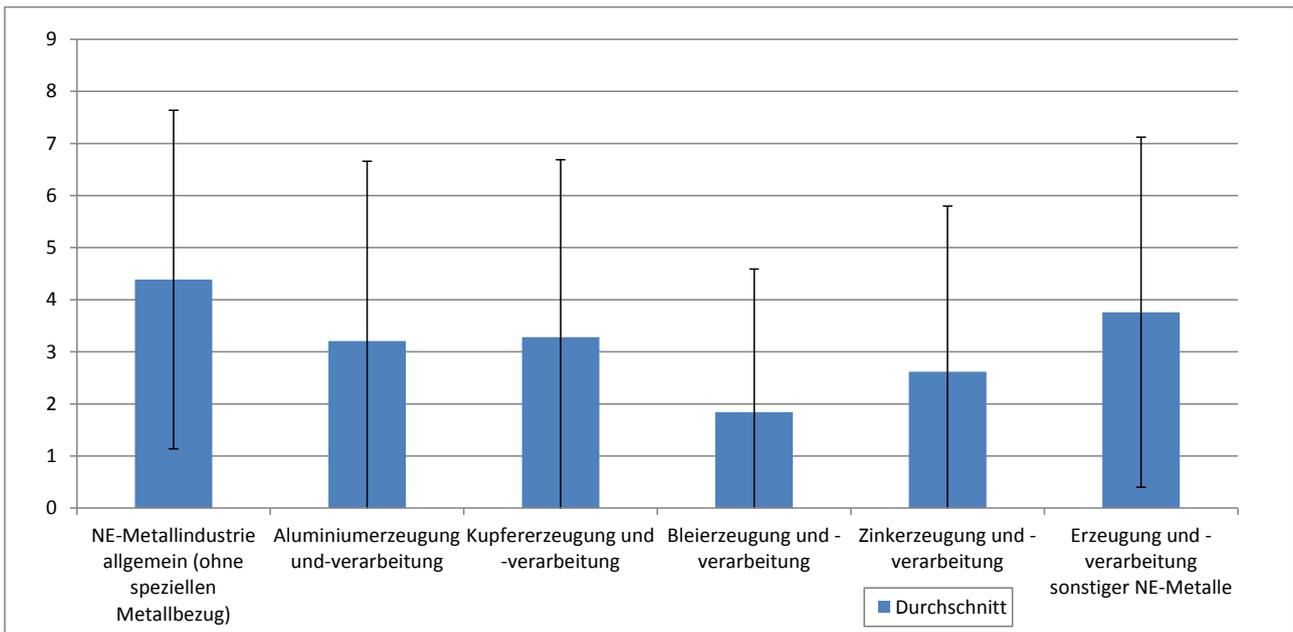
Tabelle 35: Erfahrung in der NE-Metallindustrie in Jahren, erste Befragungsrunde

Summe	Durchschnitt	Standardabweichung	Minimum	Maximum
1.049	13,11	8,85	0	30

Frage: Wie viele Jahre haben Sie sich im Rahmen Ihrer beruflichen Tätigkeit schon mit Fragen der Ressourcenschonung in der NE-Metallindustrie auseinandergesetzt?

Zudem wurden die Teilnehmer gebeten auf einer Skala von 0 bis 9 zu bewerten, welche Relevanz verschiedene Bereiche der NE-Metallindustrie in ihrer täglichen Arbeit spielen. Dahinter steht der Gedanke, dass kaum ein Teilnehmer als Experte für alle abgefragten Metalle und Bereiche gilt, sondern Expertise in der Regel für den spezifischen Arbeitsbereich vorhanden ist. Die Ergebnisse inklusive der Standardabweichung der gegebenen Antworten sind in Abbildung 27 dargestellt.

Abbildung 27: Expertise für Bereiche der NE-Metallindustrie



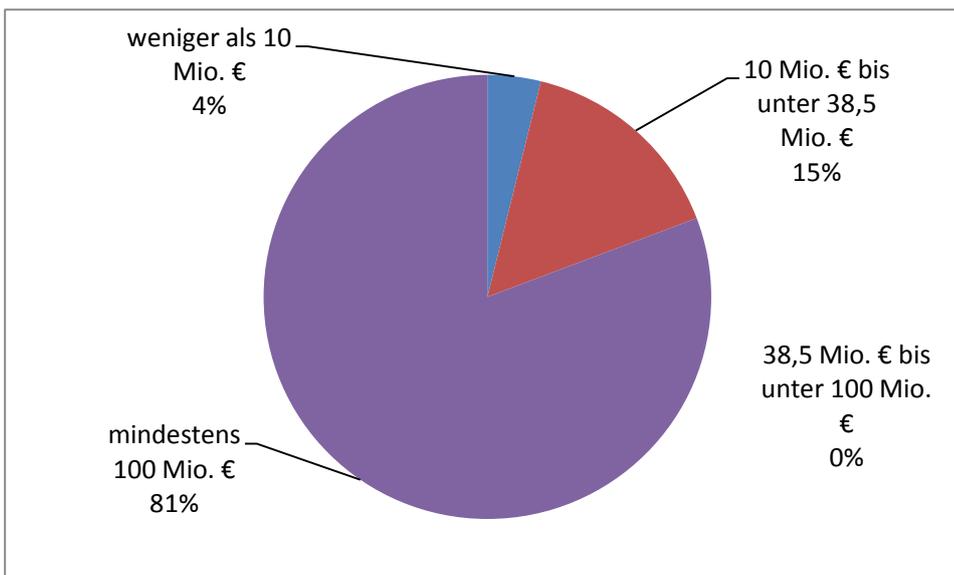
Frage: Mit welchen Nichteisenmetallen befassen Sie sich in Ihrer täglichen Arbeit; Anzeige von Durchschnitt und Standardabweichung

Weitere Details über die Teilnehmerstruktur wurden spezifisch für die verschiedenen Stakeholdergruppen abgefragt.

4.1.4.2 Unternehmensspezifische Fragen

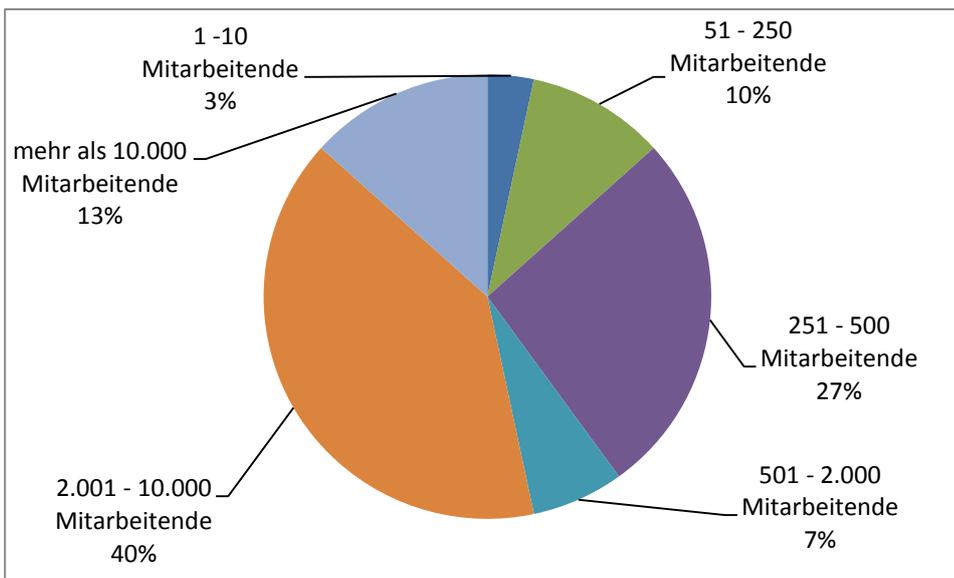
Speziell für die Teilnehmer aus der Industrie wurden Fragen nach der Unternehmensgröße (Umsatz, Mitarbeiterzahl) sowie nach dem Tätigkeitsgebiet (national, europaweit, weltweit) gestellt. Die Antworten sind in Abbildung 28, Abbildung 29 und Abbildung 30 zusammengefasst.

Abbildung 28: Umsatzstruktur der teilnehmenden Unternehmen, erste Befragungsrunde



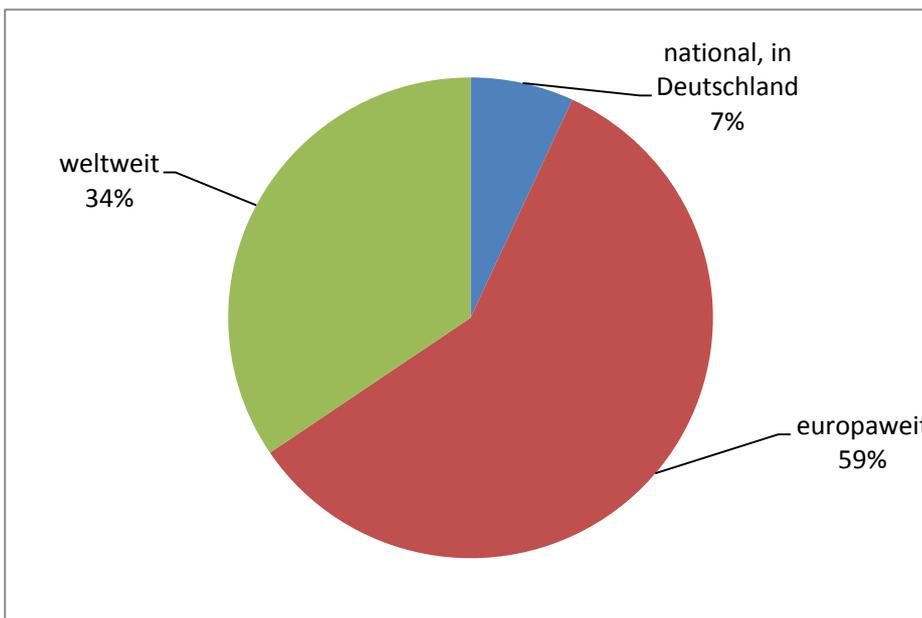
Frage: Welchen Umsatz erwirtschaftete Ihr Unternehmen im letzten Geschäftsjahr?

Abbildung 29: Mitarbeiterstruktur der teilnehmenden Unternehmen, erste Befragungsrunde



Frage: Wie viele Mitarbeiter sind in Ihrem Unternehmen/ Ihrer Institution beschäftigt?

Abbildung 30: Geographischer Tätigkeitsschwerpunkt der teilnehmenden Unternehmen

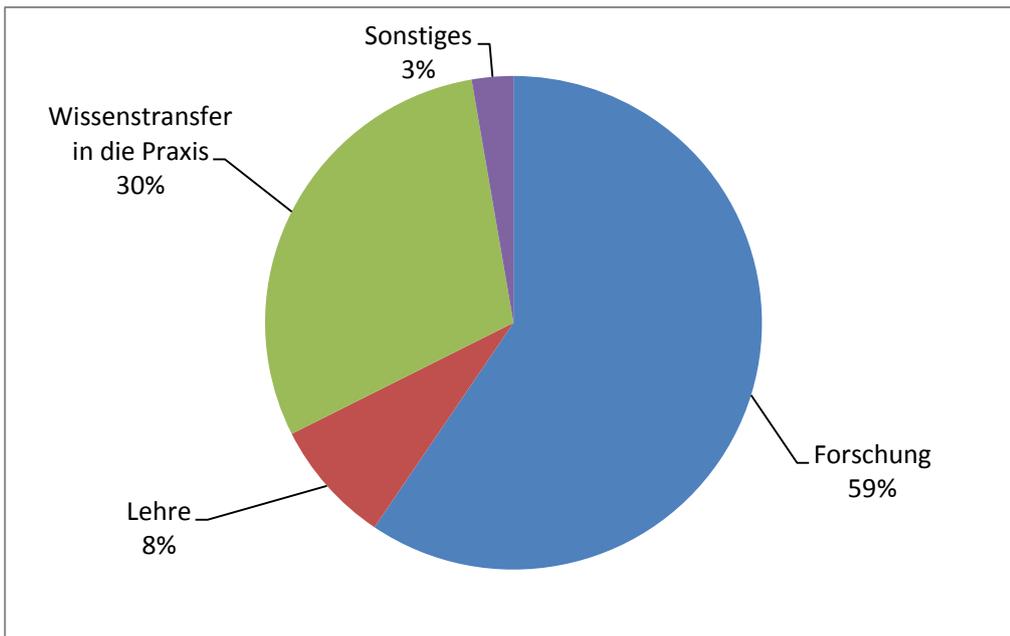


Frage: Wo ist Ihr Unternehmen / Ihre Institution überwiegend tätig?

4.1.4.3 Wissenschaftsspezifische Fragen

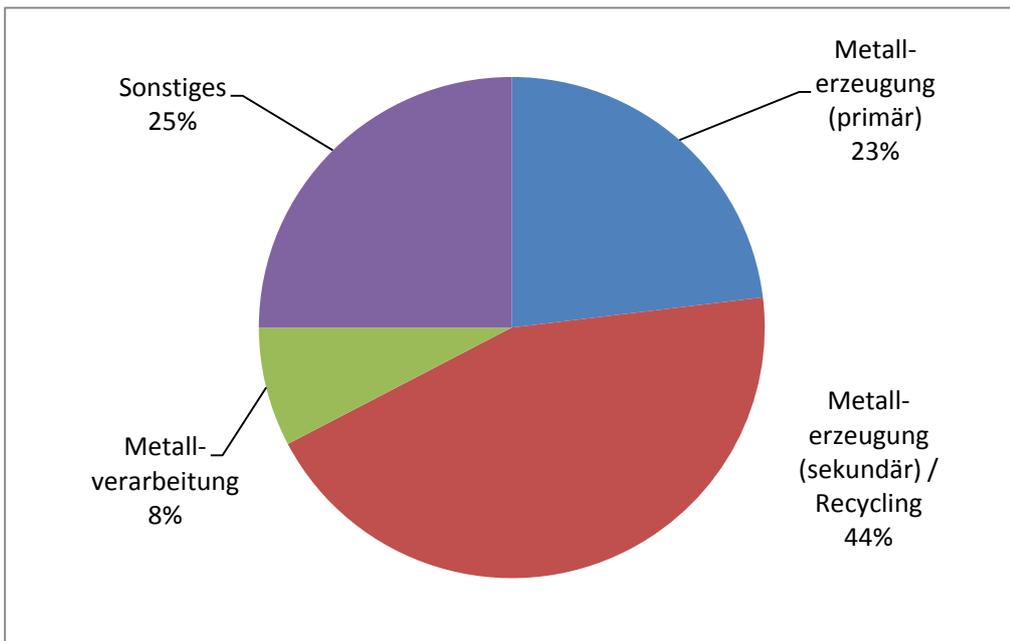
Speziell für die Teilnehmer aus der Wissenschaft wurden Fragen nach dem Schwerpunkt der wissenschaftlichen Tätigkeit sowie den Forschungsschwerpunkten gestellt. Die Ergebnisse der entsprechenden Fragen sind in Abbildung 31 und Abbildung 32 zusammengefasst.

Abbildung 31: Schwerpunkte der wissenschaftlichen Tätigkeit der Teilnehmer



Frage: Wo sehen Sie den Schwerpunkt Ihrer wissenschaftlichen Tätigkeit?

Abbildung 32: Forschungsschwerpunkte der Teilnehmer



Frage: In welcher Fachdisziplin - bezogen auf die NE-Metallindustrie- sehen Sie Ihre Forschungsschwerpunkte?
 Unter Sonstiges wurden folgende Erläuterungen gegeben: Gewinnung; Nachhaltige Produktion allgemein, Life Cycle Engineering; Industrielle Ökologie; Wertstoffrückgewinnung aus Reststoffen; Ressourceneffizienz und -schonung; Elektrolyseverfahren; Ressourceneffizienz der Förderung und Verarbeitung; Energie(-system)forschung; Entsorgung; Recycling; Metallgrenzflächen; Produktdesign zur Erhöhung des Rezyklierens.

4.1.5 Vorgehen zur Auswertung & Entwicklung des Fragebogens zur zweiten Befragungsrunde

Delphi-Befragungen erfolgen in einer nicht standardisierten Anzahl von Befragungsrunden. Die verschiedenen Befragungsrunden dienen zum einen dazu, die Antworten durch gegenseitige Beeinflussung der Experten zu verdichten, zum anderen dazu, verschiedene Antwortdimensionen abzufragen. Für das Projekt DelphiNE wurden wie beschrieben zwei Befragungsrunden festgelegt, gefolgt von zwei Workshops. Die beiden im Anschluss stattfindenden Workshops geben die Möglichkeit, dort in Interaktion mit den teilnehmenden Experten zusätzliche Antwortdimensionen (bspw. Hemmnisse zur Realisierung von Potenzialen) abzufragen, so dass die zweite Befragungsrunde auf die Verdichtung der Antworten fokussieren kann.

Das zentrale Element der zweiten Befragungsrunde ist die Rückkopplung der Antworten. Hierzu erhalten die Experten eine statistische Auswertung der ersten Befragungsrunde, bestehend aus Konsonanzkennzahlen (bspw. Median oder Mittelwert) und Dissonanzkennzahlen (bspw. Varianz oder Standardabweichung). Durch die Form der Informationsrückkopplung lassen sich die Experten in ihrer erneuten Einschätzung von den anderen Experten beeinflussen. Zusätzlich haben die Experten durch den zeitlichen Abstand zwischen den beiden Befragungsrunden Zeit, sich weitere Gedanken über die abgefragten Maßnahmen zu machen (vgl. Zelewski und Münchow-Küster 2012).

Da die zweite Befragungsrunde in DelphiNE dazu dient, die Antworten zu verdichten, können Fragen bei denen bereits ein klarer Trend besteht, von der zweiten Befragungsrunde ausgeschlossen werden. Grundidee ist dabei, dass das Projekt in erster Linie auf die Identifizierung von Maßnahmen mit hohem Ressourcenschonungspotenzial abzielt. Abgefragte Maßnahmen bei denen bereits weitgehende Einigkeit bzgl. eines hohen Potenzials herrscht, können direkt in den folgenden Workshop aufgenommen werden. Abgefragte Maßnahmen bei denen bereits weitgehende Einigkeit bzgl. eines bestehenden geringen Potenzials herrscht, können von der weiteren Berücksichtigung ausgeschlossen werden. Für Maßnahmen mit mittlerem Potenzial erfolgt eine Festlegung auf Grundlage der zeitlichen Verfügbarkeit. So werden Maßnahmen mit eher kurzfristiger Erreichbarkeit weiter betrachtet, während eher längerfristig umsetzbare Maßnahmen ausgeschlossen werden. Das hierbei angewandte Vorgehen sowie die herangezogenen Entscheidungsregeln werden im Folgenden im Detail dargestellt.

Vorgehen und Entscheidungsregeln zur Maßnahmenfilterung

Wie beschrieben, erfolgt eine Filterung der Maßnahmen in drei Kategorien: Ausschluss aus der weiteren Betrachtung im Projekt, Aufnahme in die zweite Befragungsrunde und direkte Aufnahme in den Workshop.

Die angewandten Filterregeln stützen sich hierbei auf drei Schwellenwerte:

- ▶ S_1 (Schwellenwert Einigkeit min.),
- ▶ S_2 (Schwellenwert Einigkeit max.),
- ▶ S_3 (Schwellenwert Uneinigkeit max.)

Daneben die Antworten im Folgenden wie folgt abgekürzt:

- ▶ Prozentualer Anteil der Antworten zu Potenzial: X_1 (gering), X_2 (mittel), X_3 (hoch)
- ▶ Prozentualer Anteil der Antworten zur Realisierbarkeit: Y_1 (bis 2020), Y_2 (bis 2025), Y_3 (bis 2030), Y_4 (über 2030 hinaus)

Die Filterregeln für die verschiedenen Kategorien stellen sich dabei wie folgt dar:

- ▶ Ausschluss aus weiterer Befragung
 - Einigkeit Realisierbarkeit „über 2050 hinaus“ ($Y_4 > S_1$)

- Einigkeit „geringes Potenzial“ ($X_1 > S_1$ UND $X_3 < S_2$)
- Einigkeit „mittleres Potenzial“ & Einigkeit erst über 2025 hinaus zu erreichen ($X_2 > S_1$ UND $Y_3 + Y_4 > S_1$)
- Einigkeit kein hohes Potenzial ($X_3 < S_3$ UND $X_2 < S_1$ UND $X_1 < S_1$) (bspw. „hohes Potenzial“ max. 10%, aber keine Einigkeit bzgl. „mittleres Potenzial“ und „geringes Potenzial“)
- ▶ Direkte Aufnahme in Workshop (ohne Berücksichtigung in zweiter Befragungsrunde)
 - Einigkeit „hohes Potenzial“ ($X_3 > S_1$ UND $X_1 < S_2$)
 - Einigkeit „mittleres Potenzial“ & Einigkeit bis 2025 realisierbar ($X_2 > S_1$ UND $Y_1 + Y_1 > S_1$)
 - Einigkeit kein „geringes Potenzial“ (bspw. „geringes Potenzial“ max. 10%, aber keine Einigkeit bzgl. „mittleres“ und „hohes“ Potenzial) ($X_1 < S_3$ UND $X_2 < S_1$ UND $X_3 < S_1$)
- ▶ Aufnahme in zweite Runde
 - Uneinigkeit bzw. relative Gleichverteilung der Antworten (Ausnahme: Frage wird in weiteren Fragen konkretisiert; die konkretisierenden Fragen werden entsprechend der Entscheidungsregeln aufgenommen) (ergibt sich aus Nicht-Erfüllung der obigen Regeln sowie der folgenden Regel)
 - Einigkeit „mittleres Potenzial“ & zeitliche Realisierbarkeit unklar ($X_2 > S_1$ UND $Y_{1-4} < S_1$)

Für die Schwellenwerte S_{1-3} , die beschreiben, welches Antwortverhalten als „Einigkeit“ bzw. „Uneinigkeit“ verstanden wird, erfolgt in Absprache mit dem Auftraggeber ein iteratives Vorgehen. Ziel ist es hierbei, einen Umfang des Fragebogens für die zweite Befragungsrunde von 30 bis 40 abgefragten Maßnahmen zu erhalten. Anhand mehrerer Iterationen wurden die Schwellenwerte hierbei auf $S_1 = 54\%$ und $S_2 = S_3 = 23\%$ festgelegt. Die Schwellenwerte sowie die hieraus resultierende Zahl der Maßnahmen in den drei Kategorien sind in Tabelle 36 und Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 36: Anwendung von Entscheidungsregeln - A

Parameter	Wert
Schwellenwert "Uneinigkeit" / S_3	23%
Schwellenwert "Einigkeit" - min / S_1	54%
Schwellenwert "Einigkeit" - max / S_2	23%

Tabelle 37: Anwendung von Entscheidungsregeln - B

Kategorien	Zahl der Maßnahmen
Ausschluss aus weiterer Befragung	43
Direkte Aufnahme in Workshop	54
Aufnahme in Runde 2	34

Die – vorbehaltlich der qualitativen Prüfung – auf die drei Kategorien aufgeteilten Maßnahmen teilen sich wie in Tabelle 38 dargestellt auf die einzelnen Bereiche im Technologiekomplex auf.

Tabelle 38: Aufteilung der Maßnahmen in Kategorien und Bereiche des Technologiekomplexes

Bereich des Technologiekomplexes	Maßnahmen ausgeschlossen	Maßnahmen in zweiter Befragungsrunde	Maßnahmen direkt im Workshop
Rahmenbedingungen	0	4	7
Organisatorisch-konzeptionelle Entwicklungen	0	1	4
Produktion allgemein	4	3	2

Aufbereitung und Verwertung von Schlacken, Stäuben und Schlämmen	0	0	3
Gießerei- bzw. Gussverfahren	5	1	5
Optimierung von Hoch- und Schmelzöfen	1	1	0
Optimierte Brennersysteme und erneuerbare Brennstoffe	3	0	3
Optimierung Walzverfahren	1	2	0
Optimierte Reststoff- und Abfallverwertung	2	8	13
Optimierte Gebäude- und Fabrikplanung	2	0	1
Optimierte Organisation und Logistik	3	0	0
Wärmerückgewinnung/ Abwärmenutzung	12	5	1
Installation eigener dezentraler Energieerzeugungsanlagen	2	2	0
Vorgelagerte Systeme	0	0	2
Al-Elektrolyse	2	0	2
Al-Produktion	1	1	1
Al-Wärmerückgewinnung	2	2	0
Al-Zusatzfragen	0	1	2
Cu-Zusatzfragen	3	1	3
Pb-Zusatzfragen	0	1	2
Zn-Zusatzfragen	0	1	3

Die Aufteilung versteht sich vorbehaltlich etwaiger Änderungen aus der qualitativen Prüfung.

An diese Kategorisierung anhand der Entscheidungsregeln schließt sich eine qualitative Prüfung an. Unter Berücksichtigung der gegebenen Freitextantworten und der unvollständigen Fragebögen sowie unter Rücksprache mit dem Auftraggeber wird hierbei geprüft, ob Gründe für eine Verschiebung einzelner Maßnahmen zwischen den Kategorien bestehen.

Die Antworten auf die 100 Mio.-Euro Frage werden für die erneute Befragung in der zweiten Befragungsrunde aufbereitet. Hierzu werden die häufig genannten Maßnahmen zusammengefasst und zwei Kategorien A) Rahmenbedingungen, organisatorisch-konzeptionelle Maßnahmen und unternehmensübergreifende Kooperationen und B) Produktionstechnische Maßnahmen zugeordnet. Jede Kategorie soll danach zwischen 5 und 10 Maßnahmen beinhalten, die den Teilnehmern erneut vorgelegt werden. Anders als in der ersten Befragungsrunde werden die Kandidaten nun gebeten, ein Budget von 100 Mio. Euro auf die Maßnahmen aufzuteilen. Die hierbei nicht berücksichtigten Maßnahmen werden später in der Vorbereitung des Zukunftsworkshops ebenfalls berücksichtigt.

4.1.6 Fragebogenentwicklung zur zweiten Befragungsrunde

Der Aufbau des Fragebogens für die zweite Befragungsrunde entspricht grundsätzlich dem Aufbau der ersten Befragungsrunde. Einem Vorspann mit Fragen zur Identifizierung der Teilnehmer schließt sich der Fachteil an. Im Nachspann werden weitere Fragen zur Person gestellt und die Möglichkeit zur Kommentierung des Fragebogens gegeben.

Der Vorspann wurde im Vergleich zur ersten Befragungsrunde gekürzt und beschränkt sich auf die Frage nach der Zugehörigkeit zur Stakeholdergruppe.

Der Fachteil beinhaltet 28 Maßnahmen, die bezüglich ihres Potentials und der zeitlichen Realisierbarkeit zu bewerten sind, zusätzliche Freitext- und Auswahlfragen sowie eine modifizierte Version der 100-Mio.-Euro-Frage. Aufbauend auf der Anwendung der beschriebenen Entscheidungsregeln haben sich zunächst 34 Maßnahmen zur potentiellen Abfrage in der zweiten Befragungsrunde ergeben. Im Rahmen der qualitativen Prüfung wurden weitere Maßnahmen ausgeschlossen und einige Fragen durch Freitextfragen ersetzt. Ferner wurden in der qualitativen Prüfung vier zunächst ausgeschlossene Maßnahmen für die Aufnahme in den Zukunftsworkshop bestimmt. Die vollständige Auflistung der Maßnahmen mit Einteilung in die drei Kategorien (Ausschluss, Befragungsrunde 2, Workshop) sowie die Ergänzungen aus der qualitativen Prüfung finden sich im Anhang 2.

Die ausgewählten Maßnahmen werden den Teilnehmern mit den statistisch und graphisch aufbereiteten Ergebnissen aus der ersten Befragungsrunde zur erneuten Einstufung vorgelegt. Um ein klareres Antwortbild zu erreichen, wurden die Antwortmöglichkeiten zum Potenzial der Maßnahmen modifiziert. Statt den Antwortmöglichkeiten gering – mittel – hoch ist in der zweiten Befragungsrunde eine Einstufung entsprechend der Antwortmöglichkeiten gering – eher gering – eher hoch – hoch vorzunehmen. Hierdurch soll die im Nachgang zur Befragung anstehende Entscheidung, ob die Maßnahmen in den Workshop aufgenommen werden oder ausgeschlossen, vereinfacht werden.

Bei einigen Fragen ist im Rahmen der qualitativen Prüfung unter Berücksichtigung der in der ersten Runde gegebenen Freitextantworten eine Präzisierung des Fragetextes oder eine Aufsplittung in zwei einzelne Fragen vorgenommen worden.

Zur Feinabstimmung des Fragebogens wird ein Pre-Test unter Teilnahme des Projektteams sowie des Auftraggebers durchgeführt. Der auf dieser Basis – inklusive der Überarbeitungen, die sich aus dem Pre-Test ergeben haben – erstellte Fragebogen findet sich im Anhang.

4.1.7 Einladung und Durchführung der zweiten Befragungsrunde

Der potentielle Teilnehmerstamm der zweiten Befragungsrunde ergibt sich aus den vollständigen Antworten der ersten Befragungsrunde. Aus dieser Gruppe hatten drei Teilnehmer über die sogenannte „OptOut“ Funktion angegeben, dass sie keine weiteren automatischen Emails erhalten wollen. Diese drei Teilnehmer wurden persönlich kontaktiert und nach ihrer Bereitschaft zur Teilnahme an der zweiten Befragungsrunde gefragt. Von zweien kam hierzu eine positive Rückmeldung. Hieraus ergab sich eine Gruppe von 81 eingeladenen Teilnehmern für die zweite Befragungsrunde.

Als Einladungsmodus wurde analog zur ersten Befragungsrunde die Einladung per Email gewählt (Versand der Einladungen am 03.03.2015). Neben einer Erinnerungsemail zur Teilnahme ist wie in der ersten Befragungsrunde eine telefonische Nachfassaktion durchgeführt worden. Die Laufzeit der zweiten Befragungsrunde dauerte an vom 03.03.2015 bis 10.05.2015.

4.1.8 Ergebnisse und Auswertung der zweiten Befragungsrunde

4.1.8.1 Teilnehmerstatistik

Die Größen zur Teilnahmestatik stellen sich wie folgt dar:

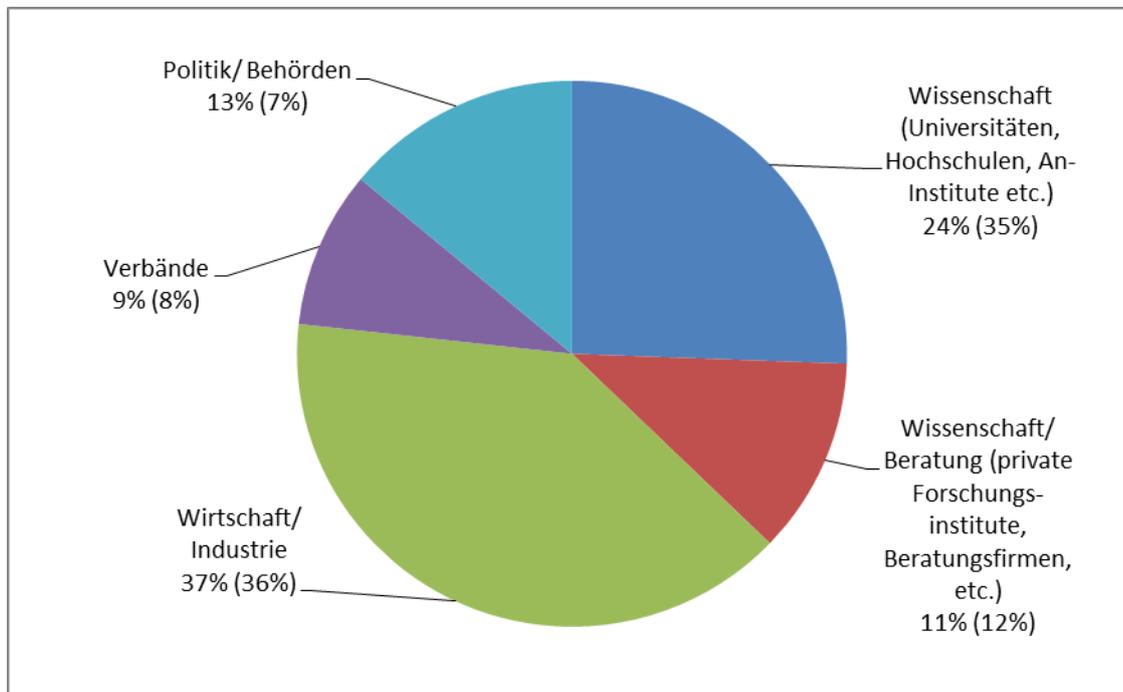
- ▶ Gesamtbeteiligung: 81
- ▶ Rücklaufquote: $64/81 = 79\%$
- ▶ Beendigungsquote: $46/81 = 57\%$

Von den 81 eingeladenen Teilnahmen haben entsprechend 64 die Befragung begonnen und 46 die Befragung abgeschlossen. Die abgeschlossenen Fragebögen stellen den Grundstock für die weitere Auswertung dar.

Die Teilnehmerstruktur ist in Abbildung 33 dargestellt. Im Vergleich zur ersten Befragungsrunde zeigen sich ein paar Verschiebungen in der Teilnehmerstruktur. Die größte Teilnehmergruppe macht

weiterhin die Wirtschaft/ Industrie mit 37 % (im Vergleich zu 36 % in der ersten Befragungsrunde) aus. Der Anteil der Teilnehmer aus der universitären Forschung ist von 35 % auf 24 % gesunken. Der Anteil von Teilnehmern aus dem Bereich der Politik bzw. Behörden ist von 7 % auf 13 % gestiegen, der Anteil der Teilnehmer von Verbänden von 8 % auf 9 %. Private Forschung bzw. Wissenschaft macht nun 11 % aus, im Vergleich zu 12 % in der ersten Befragungsrunde.

Abbildung 33: Teilnehmerstruktur der Delphi-Befragung, zweite Befragungsrunde



Die Werte in Klammern geben den jeweiligen Anteil in der ersten Befragungsrunde wieder.

Wie in Befragungsrunde 1 wurden die Teilnehmer danach gefragt, seit wie vielen Jahren sie sich mit Fragen der Ressourcenschonung in der NE-Metallindustrie befassen. Die Antworten sind in Tabelle 39 zusammengefasst. Bei einer durchschnittlichen Erfahrung von 14 Jahren (im Vergleich zu 13,1 Jahren in der ersten Befragungsrunde) ergeben sich insgesamt 549 Jahre Erfahrung.

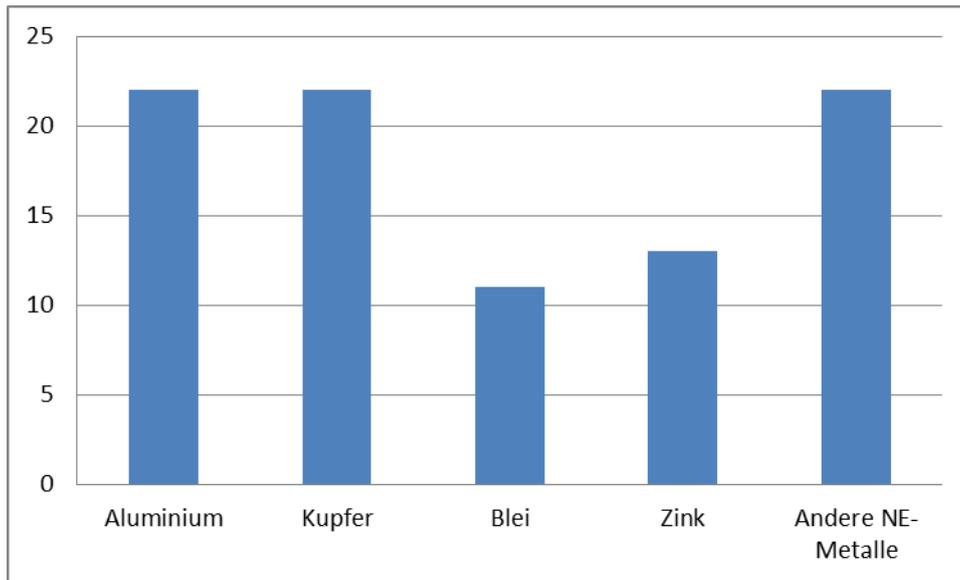
Tabelle 39: Erfahrung in der NE-Metallindustrie in Jahren, erste und zweite Befragungsrunde

Runde	Summe	Durchschnitt	Standardabweichung
1	1.049	13,11	8,85
2	549	14,08	9,3

Frage: Wie viele Jahre haben Sie sich im Rahmen Ihrer beruflichen Tätigkeit schon mit Fragen der Ressourcenschonung in der NE-Metallindustrie auseinandergesetzt?

Daneben wurden die Teilnehmer befragt, mit welchen Metallen sie sich im Rahmen ihrer professionellen Tätigkeit befassen, wobei Mehrfachnennungen möglich waren. 22 Experten haben hierbei Aluminium und Kupfer genannt, Blei wurde 11-mal, Zink 13-mal genannt. Andere NE-Metalle wurden 22-mal genannt. Abbildung 34 fasst die Ergebnisse zur Frage zusammen.

Abbildung 34: Abfrage der Expertise nach Metallen



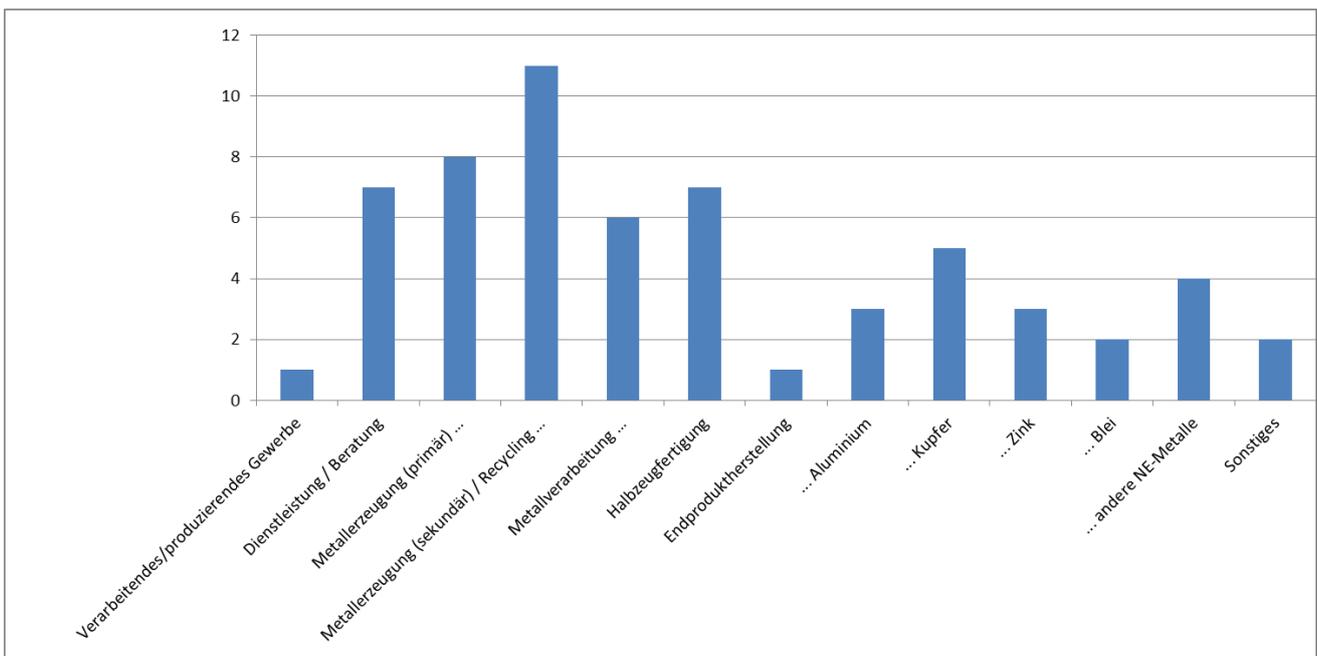
Frage: Mit welchen NE-Metallen befassen Sie sich hauptsächlich im Rahmen Ihrer professionellen Tätigkeit?

Weitere Details über die Teilnehmerstruktur wurden analog zur ersten Befragungsrunde spezifisch für die verschiedenen Stakeholdergruppen abgefragt.

4.1.8.2 Unternehmensspezifische Fragen

Zunächst wurde für die Teilnehmer aus der Industrie sowie der privaten Forschung und Beratung eine konkretisierende Frage nach den Tätigkeitsfeldern gestellt. Die Antworten hierzu sind in Abbildung 35 dargestellt.

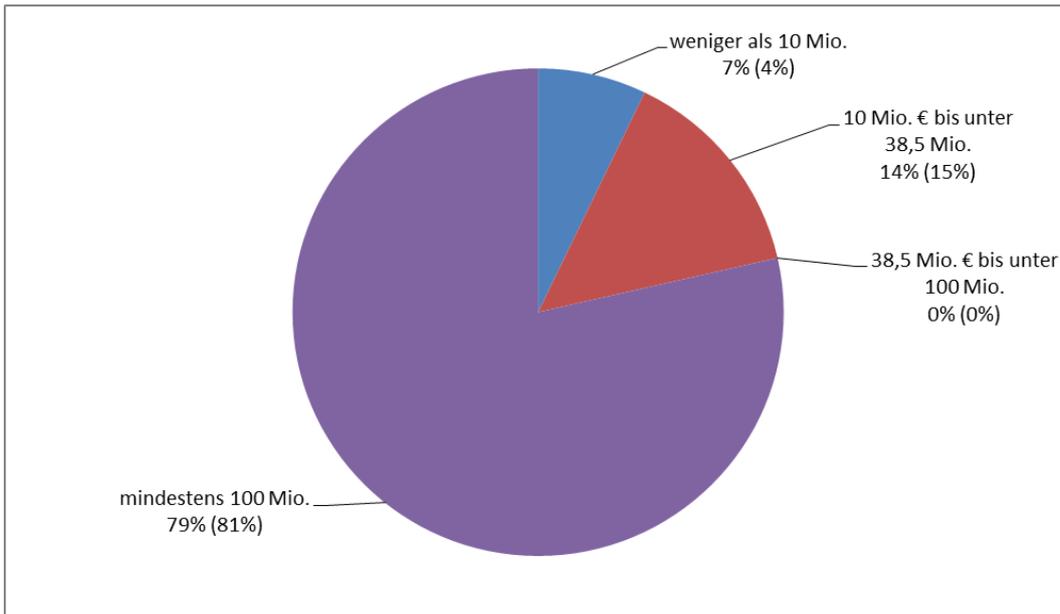
Abbildung 35: Zuordnung nach Tätigkeitsfeldern



Frage: Welchen Tätigkeitsfeldern ist Ihr Unternehmen zuzuordnen?

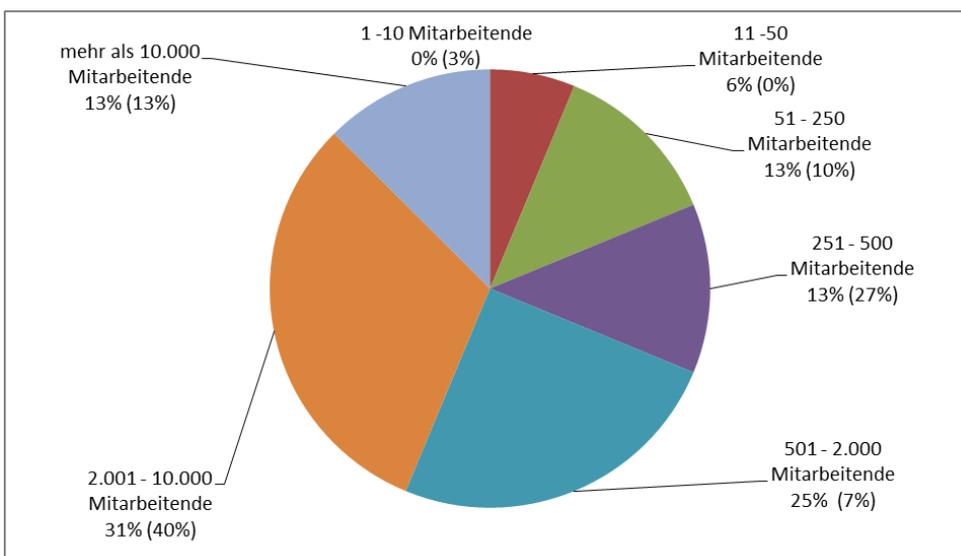
Analog zu Befragungsrunde 1 wurden daneben Fragen nach der Unternehmensgröße (Umsatz, Mitarbeiterzahl) sowie dem geographischen Tätigkeitsgebiet (national, europaweit, weltweit) gestellt. Die Ergebnisse hierzu finden sich in Abbildung 36 und Abbildung 37. In Klammern sind dabei jeweils die Ergebnisse aus der ersten Befragungsrunde dargestellt. Bei der Frage nach der Mitarbeiterzahl sind hierbei teilweise kleinere Abweichungen zur ersten Befragungsrunde zu sehen (bspw. 6% mit 11-50 Mitarbeitenden im Vergleich zu 0 %) in der ersten Befragungsrunde). Diese Abweichungen lassen sich jedoch damit erklären, dass die Beantwortung der Frage in beiden Befragungsrunden keine Pflicht darstellte und zudem in Runde zwei lediglich 16 Teilnehmer die Frage beantwortet haben.

Abbildung 36: Umsatzstruktur der teilnehmenden Unternehmen, zweite Befragungsrunde



Frage: Welchen Umsatz erwirtschaftete Ihr Unternehmen im letzten Geschäftsjahr?
 In Klammern sind die Ergebnisse aus der ersten Befragungsrunde dargestellt.

Abbildung 37: Mitarbeiterstruktur der teilnehmenden Unternehmen, zweite Befragungsrunde

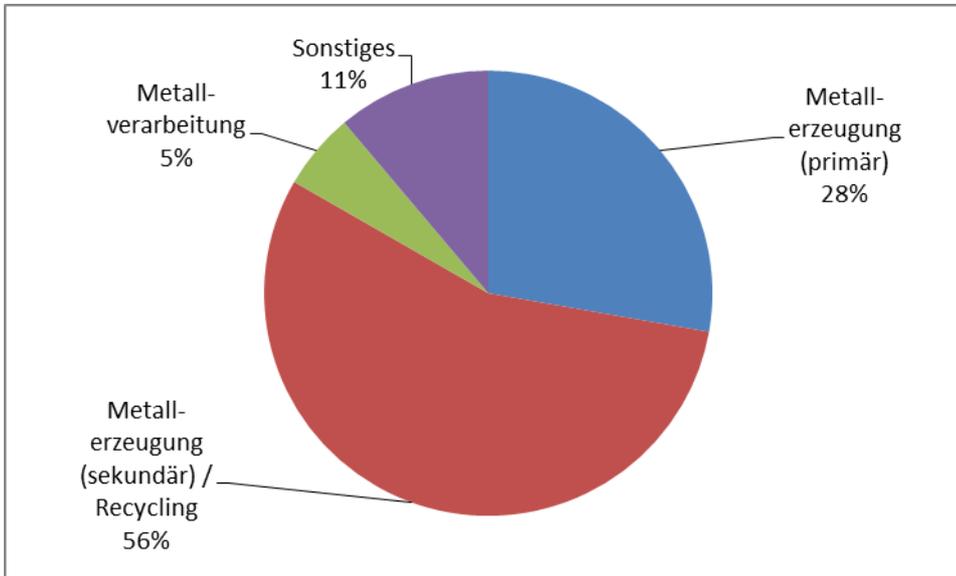


Frage: Wie viele Mitarbeiter sind in Ihrem Unternehmen/ Ihrer Institution beschäftigt?
 In Klammern sind die Ergebnisse aus der ersten Befragungsrunde dargestellt.

4.1.8.3 Wissenschaftsspezifische Fragen

Speziell für die Teilnehmer aus der Wissenschaft wurden Fragen nach dem Schwerpunkt der wissenschaftlichen Tätigkeit bzw. den Forschungsschwerpunkten gestellt. Die Ergebnisse der entsprechenden Frage sind in Abbildung 38 zusammengefasst.

Abbildung 38: Forschungsschwerpunkte der Befragten, zweite Befragungsrunde



Frage: In welcher Fachdisziplin – bezogen auf die NE-Metallindustrie – sehen Sie Ihre Forschungsschwerpunkte?

4.1.8.4 Auswertung des fachlichen Teils

Die Auswertung des fachlichen Teils zielt darauf ab, die abgefragten Maßnahmen dahingehend zu filtern, ob diese in den Workshop aufgenommen werden oder von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden. Grundlage für die Filterung ist die Einschätzung der Experten, ob die abgefragten Maßnahmen ein (eher) hohes oder (eher) geringes Potenzial in Bezug auf eine gesteigerte Ressourcenschonung haben. Zur Filterung wird dabei folgende Entscheidungsregel angewendet:

- ▶ Wenn mind. 66,67 % das Potential der Maßnahme mit eher hoch oder hoch bewertet haben, wird die Maßnahme in den Workshop aufgenommen. Ansonsten wird die Maßnahme von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Der starren Anwendung dieser Entscheidungsregel schließt sich eine qualitative Prüfung in Austausch mit dem Auftraggeber an, in der geprüft wird, ob weitere Maßnahmen in den Workshop aufgenommen werden. Hierbei werden solche Maßnahmen betrachtet, die zu 50 % bis 66,67 % mit eher hoch bis hoch bewertet wurden.

Aus der Anwendung der Entscheidungsregel ergeben sich 8 Maßnahmen zur direkten Aufnahme in den Zukunftsworkshop, 12 Maßnahmen werden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. 8 Maßnahmen werden qualitativ bzgl. ihrer weiteren Berücksichtigung geprüft. Die qualitative Prüfung ergab in Absprache mit dem Auftraggeber 6 zusätzliche Maßnahmen zur Diskussion im Workshop sowie zwei ausgeschlossene Maßnahmen.

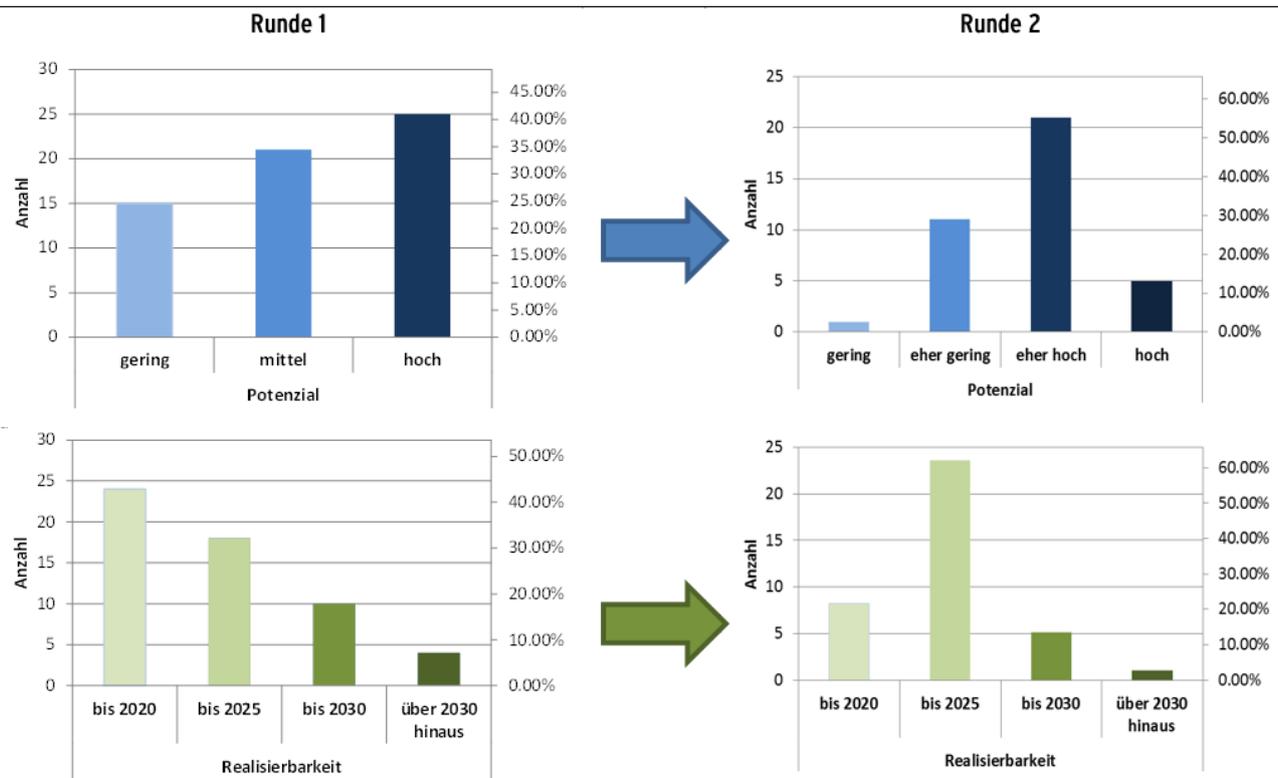
Die Bündelung und Aufbereitung der Maßnahmen für die Diskussion im Zukunftsworkshop sowie die Auswertung der Auswahl- und Freitextfragen erfolgt im Rahmen der Vorbereitung für den Zukunftsworkshop. Die vollständigen Ergebnisse der zweiten Befragungsrunde finden sich im Anhang.

4.1.8.5 Beispielhafte Ergebnisse

Im Folgenden sind beispielhaft einige Ergebnisse der zweiten Befragungsrunde visualisiert. Abbildung 39 zeigt deutlich, wie bei manchen Fragen eine Verdichtung der Antworten stattgefunden hat. Bei beiden abgefragten Maßnahmen ist in der zweiten Befragungsrunde eine deutliche Tendenz der Antworten zur einem hohen Potenzial erkennbar. Auch bezüglich der Realisierbarkeit ist nach der zweiten Befragungsrunde eine deutliche klarere Tendenz im Antwortverhalten erkennbar. Die in Abbildung 40 hingegen aufgeführten Beispiele zeigen, dass nicht in allen Fällen in der zweiten Befragungsrunde eine klare Tendenz zu erkennen ist.

Abbildung 39: Beispielhafte Ergebnisse der zweiten Befragungsrunde I

Optimierung der Reststoff- und Abfallverwertung: Ressourcenbasierte Recyclingquoten (bezogen auf End-of-Life [Produktlebensende] Abfälle).



Konsistenzprüfung und Harmonisierung von Gesetzgebung, Normen und politischen Rahmenbedingungen (Gesetz-Folgeabschätzung; Abfall, Rohstoff, Energie, grenz-überschreitende Exporte, Schadstoff...).

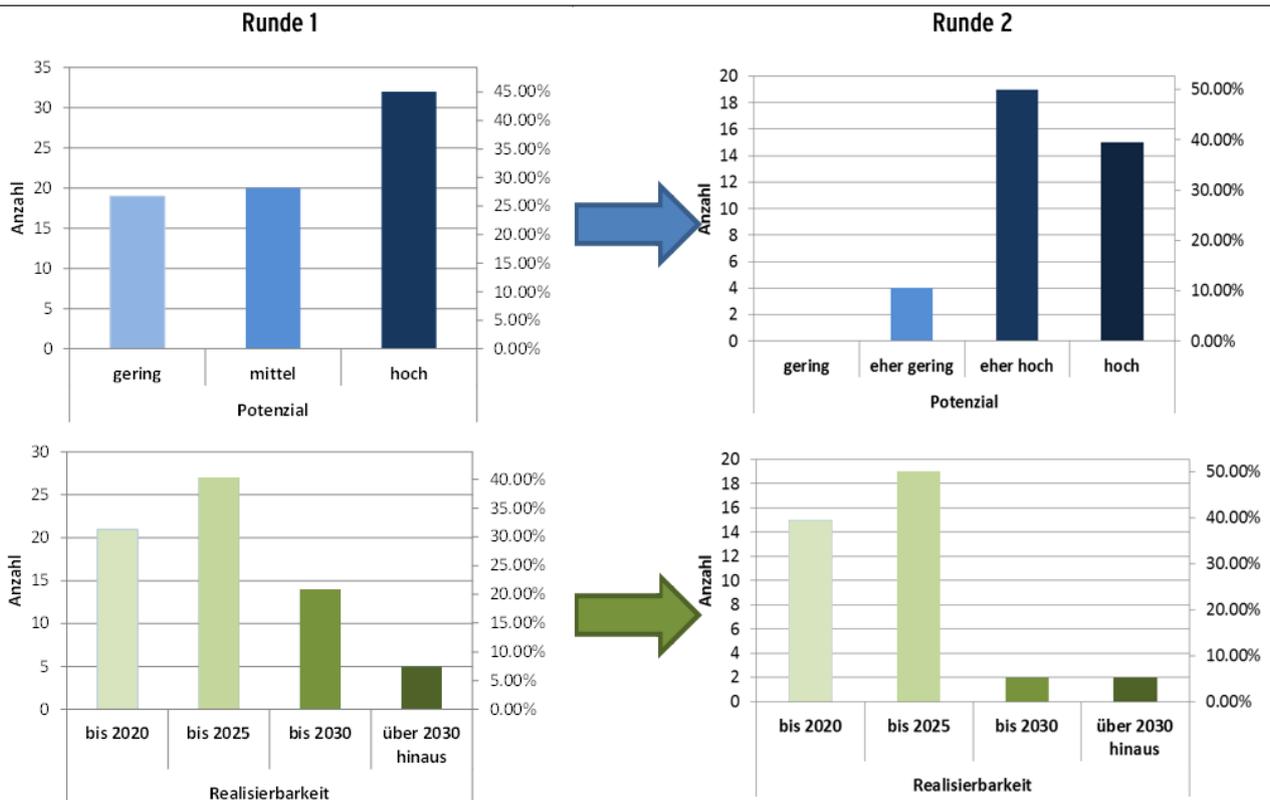
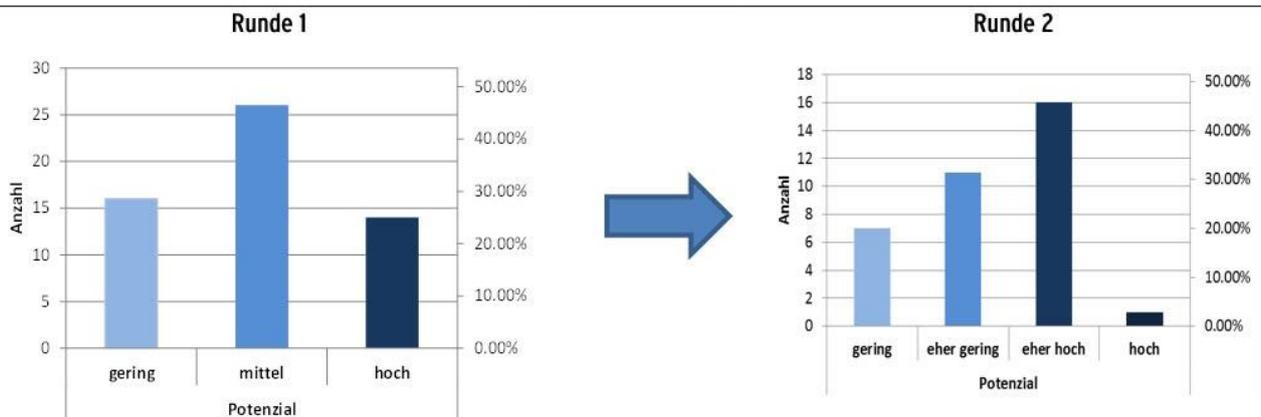
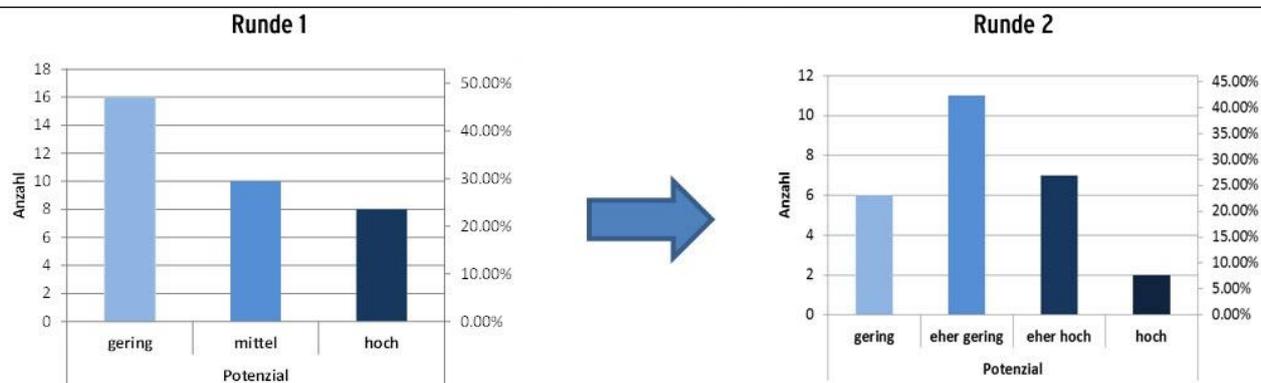


Abbildung 40: Beispielhafte Ergebnisse der zweiten Befragungsrunde II

Einführung von Steuerungskonzepten zur Abschaltung von Maschinen in Schwachlastzeiten.



Gießerei- bzw. Gussverfahren: Einsatz alternativer Brennstoffe (alternativ= Abfälle, NaWaRo, EE-Methan, EE-H2, ...).



4.1.9 Umgang mit den Ergebnissen der 100 Mio. Euro Frage

In der zweiten Runde wurden die Teilnehmer gebeten, jeweils 100 Mio Euro auf Maßnahmen aus zwei Kategorien (A) Rahmenbedingungen, organisatorisch-konzeptionelle Maßnahmen und unternehmensübergreifende Kooperationen und B) Produktionstechnische Maßnahmen) aufzuteilen. Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

Tabelle 40: Ergebnisse der 100 Mio. Euro Frage (2. Runde): Organisatorisch-konzeptionelle Maßnahmen

Maßnahmen zu Rahmenbedingungen und organisatorisch-konzeptionelle Maßnahmen	Summe der Antworten (Millionen Euro)
Investitionsförderung für Maßnahmen zur Ressourcenschonung	820
Optimierung der Sammlung und Erfassung von Altprodukten	705
Vermeidung illegaler Exporte von Altprodukten	530
Förderung zur Ankopplung an das städtische Fernwärmenetz	495
Förderung von Ansätzen zur Monetarisierung von Ressourcenschonung	485
Verbesserte Ausbildung in Bezug auf Ressourceneffizienz	440
Förderung von Ansätzen zur industriellen Symbiose	420

Tabelle 41: Ergebnisse der 100 Mio. Euro Frage (2. Runde): Produktionsnahe/ fertigungstechnische Maßnahmen

Produktionsnahe/ fertigungstechnische Maßnahmen	Summe der Antworten (Millionen Euro)
F&E zu neuen Aufbereitungsverfahren für Altprodukte	700
F&E zu neuen effizienteren Schmelz- und Raffinationsprozessen, insbesondere für komplexe Rohstoffen	660
F&E sowie Förderung zur Integration der NE-Metallindustrie in die Energiewende	630
F&E und Förderung für Nutzung von Niedertemperaturabwärme sowie Umwandlung von Abwärme in Strom	535
F&E sowie Investitionsförderung zur Schlackenaufbereitung	390
Förderung zur globalen Verbreitung von BVT, insbesondere bzgl. Primärerzeugung und Recycling	365
F&E zu inerten Anoden für die Aluminiumelektrolyse	175
Investitionsförderung zur Verbreitung des Einsatzes von Regenerativbrennern	145

Die Ergebnisse zeigen in Bezug auf die am höchsten „dotierten“ Maßnahmen eine deutliche Übereinstimmung mit den Befragungsergebnissen zur Bewertung von Potenzial und Realisierbarkeit der Einzelmaßnahmen und unterstützen die Maßnahmenauswahl zur Diskussion im Zukunftsworkshop. Gleichzeitig werden Ergebnisse auf die 100 Millionen Euro Frage aufbereitet, um sie visualisiert den Teilnehmern des Zukunftswshops als Diskussionsgrundlage vorzulegen.

4.1.10 Zusammenfassung: Output der Delphi-Befragung

In den beiden Befragungsrunden wurden Maßnahmen aus den folgenden thematischen Bereichen abgefragt:

- ▶ gesetzliche und finanzielle Rahmenbedingungen,
- ▶ Aufbereitung und Verwertung von Schlacken, Stäuben und Schlämmen,
- ▶ Gießerei- bzw. Gussverfahren,
- ▶ Brennersysteme und erneuerbare Brennstoffe,
- ▶ Optimierung von Walzverfahren,
- ▶ Reststoff- und Abfallverfahren.

Für diese thematischen Bereiche wurden in der ersten Befragungsrunde rund 130 Maßnahmen bezüglich ihres Potenzials und ihrer zeitlichen Realisierbarkeit abgefragt. Im Zuge der Auswertung der ersten Fragerunde wurden Maßnahmen, für die sich bereits eine klare Tendenz zu einem nur niedrigen Potenzial zeigt, von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Maßnahmen mit einem klar bewerteten hohen Potenzial wurden für die Diskussion im Zukunftsworkshop ausgewählt. Maßnahmen mit unklarer Bewertung wurden den Teilnehmern in der zweiten Befragungsrunde mit den visualisierten Ergebnissen der ersten Befragungsrunde erneut vorgelegt (vgl. Ausführungen in Abschnitt 4.1.8). Im Zuge der Auswertung der zweiten Befragungsrunde ergaben sich schließlich weitere Maßnahmen zur Diskussion im Zukunftsworkshop sowie Maßnahmen, die von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen wurden.

Von den Eingangs 130 Maßnahmen, welche den Teilnehmern zu Bewertung vorlagen, wurden schließlich 71 zur Diskussion und weiteren Bewertung im Zukunftsworkshop ausgewählt. Entsprechend hat

die Befragung 59 Maßnahmen ergeben, deren Potenzial tendenziell als eher gering eingestuft wurde und die von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen wurden.

5 Diskussion und Bewertung von Ressourcenschonungsmaßnahmen im Zukunftsworkshop

Die Maßnahmen, welche sich aus der Delphi-Befragung zur Diskussion im Workshop ergeben haben, wurden für den Zukunftsworkshop mit den Befragungsergebnissen graphisch aufbereitet und nach vier Themenkomplexen gegliedert:

- ▶ Rahmenbedingungen und organisatorisch-konzeptionelle Entwicklungen,
- ▶ Reststoff- und Abfallverwertung sowie Verwertung und Aufbereitung von Schlacken, Stäuben und Schlämmen,
- ▶ Energienutzung und -erzeugung (EE, Strom, Wärme) und Gebäudegestaltung und
- ▶ Primärproduktion, Metallurgie und Gießereitechnik, Hoch- und Schmelzöfen sowie Brennersysteme.

Ziel des Zukunftswshops ist eine Diskussion der Befragungsergebnisse (in Form der Maßnahmen, deren Potenzial als hoch bewertet wurde) und eine Priorisierung. Vorbereitung und Durchführung des Zukunftswshops lassen sich in drei Phasen unterteilen:

1. Vorbereitungsphase: Aufbereitung Ergebnisse Delphi-Befragung
2. Durchführung: Workshoparbeit
3. Nachbereitung: Dokumentation und Ableitung von Maßnahmenbündeln

Die Vorbereitung beinhaltet im Wesentlichen die Aufbereitung der Ergebnisse der Delphi-Befragung. Hierzu wurden solche Maßnahmen zur Diskussion in den Zukunftsworkshop aufgenommen, für die sich in einer der beiden Befragungsrunden ein klarer Trend für ein hohes Potenzial gezeigt hat. Diese Maßnahmen wurden für die Diskussion im Workshop einem der vier genannten Themenkomplexen zugeordnet. Die den Themenkomplexen zugeordneten Maßnahmen fanden sich zur Ergebnissicherung zum einen im Handout zum Workshop wieder, zum anderen wurden sie auf Plakaten bzw. vorbereiteten Metaplanwänden präsentiert, die die Grundlage für die Diskussion mit den Teilnehmern darstellten. Für jede Maßnahme ist eine Visualisierung der Befragungsergebnisse in Form von „Tachometern“ erstellt worden, die die Durchschnittswerte der Befragungsergebnisse zu den beiden Antwortdimensionen Potenzial und Realisierbarkeit veranschaulichen. Ein Beispiel für diese Form der Visualisierung findet sich in Abbildung 41.

Abbildung 41: Visualisierung der Befragungsergebnisse in Form von Tachometern

Verbesserte Aufbereitung von Schlacken aus der Primärgewinnung (insbesondere Seltene Erden).



Die eigentliche Durchführung des Workshops beinhaltete mehrere Kurzvorträge zu Beginn, gefolgt von einer längeren Arbeitsphase in Kleingruppen und einem gemeinsamen Abschluss im Plenum. Dabei standen zwei zentrale Ziele im Vordergrund:

- ▶ Zum einen gilt es, die Ergebnisse der Delphi-Befragung mit den Teilnehmern zu diskutieren. Hierbei werden auch offene Fragen sowie mögliche Ergänzungen und Spezifizierung vorgenommen.
- ▶ Zum anderen ist die Anzahl der Maßnahmen mit einem als hoch eingeschätzten Potenzial für die Weiterverarbeitung im Szenarienworkshop weiter zu verdichten.

Die Nachbereitung des Workshops beinhaltet neben der reinen Dokumentation der Ergebnisse (vgl. Abschnitt 5.1) auch eine Bündelung und zusammenfassende Beschreibung (vgl. Abschnitt 5.2).

5.1 Ergebnisse des Zukunftsworksops

Tabelle 42 zeigt die Maßnahmen, deren Potential nach beiden Befragungsrunden und Zukunftsworkshop am höchsten bewertet wurde, gegliedert nach den vier Themenbereichen.

Tabelle 42: Maßnahmen mit höchstem Potenzial - Ergebnisse des Zukunftsworksops

Themenbereich	Maßnahme
Rahmenbedingungen und organisatorisch-konzeptionelle Entwicklungen	Gesetzliche und finanzielle Rahmenbedingungen: - Abgleich von widersprüchlichen Regelungen (in Bezug auf Chemikalienrecht)
	Verbesserung der Investitionsanreize für Energie- und Ressourceneffizienz Maßnahmen.
	Akzeptanz längerer Amortisationszeiten (>4 Jahre) um innovative Projekte umzusetzen.
	Anpassung der Gesetzgebung (Entfernung Fehlanreize) – Verhindern, dass Energieeinsparungen die EEG-Befreiung gefährden.
Reststoff- und Abfallverwertung sowie Verwertung und Aufbereitung von Schlacken, Stäuben	Vermeidung Downcyclings durch optimierte Schrotterfassung und –sortierung sowie durch eine bessere Erfassung der nichteisenmetallhaltigen End-of-Life-Produkte. - Sortierung gemischter Schrotte. - Einsatz innovativer Sortiertechnik mit erhöhter Metallausbeute.
	Technologische Weiterentwicklung zur Verarbeitung komplexer werdender Sekundärmaterialien.
	Produktdesign-Fertigung für ein vereinfachtes Recycling („Design-for-Recycling“).
	Mehr und bessere Kontrolle von Abfall Im- und Exporten; Vermeidung illegaler Exporte; Bessere Überwachung der Rückflüsse
	Verbesserte Aufbereitung von Schlacken aus der Primärgewinnung
	F&E zur Schnittstellenoptimierung Aufbereitung – Metallurgie für (thermodynamisch) komplexe primäre + sekundäre Konzentrate.
Energienutzung und -erzeugung (EE, Strom, Wärme) und Gebäudegestaltung	Einsatz dezentraler erneuerbarer Energie (z.B. BHKW, Windenergie).
	Gebäudegestaltung zur Optimierung von Heizung und Lüftung.
	Industrial Symbiosis: Wärme-, Strom etc. Systemverbünde nutzen / fördern für z.B. Industrieparks (mit histor. Struktur)
	Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien: Lastmanagement zur Nutzung von überschüssigem EE-Strom.
	Technologische Weiterentwicklung zur Verarbeitung komplexer werdender Konzentrate.
	Prozessinterne Wärmerückführung.
	Externe Abwärmenutzung

Primärproduktion, Metallurgie und Gießertechnik, Hoch- und Schmelzöfen sowie Brennersysteme

Industrie 4.0
Optimierter Brenneinsatz

5.2 Verdichtung und Strukturierung der Ergebnisse des Zukunftsworkshops

Die Ressourcenschutzmaßnahmen, für die in Delphi-Befragung und Zukunftsworkshop das höchste Potential identifiziert wurde, werden im folgenden gebündelt und kurz beschrieben. Hierbei werden Kommentare, Anmerkungen der Experten sowie Diskussionsinhalte aus Delphi-Befragung und Zukunftsworkshops berücksichtigt.

Die Bündelung der Maßnahmen erfolgt nach Themenbereich, Zielbetrag (Beitrag zur Verwirklichung der Green Economy/ siehe Projektschwerpunkte) und betroffenem Akteur bzw. Akteursgruppe (Industrie/ Unternehmen, Politik/ Behörden, Wissenschaft). Es ergeben sich 6 Maßnahmenbündel.

► Maßnahmenbündel 1A

- Themenbereich: Rahmenbedingungen
- Zielbeitrag: Steigerung der Ressourceneffizienz (durch verbesserte Bedingungen für Umsetzung von Ressourcenschutzmaßnahmen)
- Zuständiger Akteur: Politik/ Behörden

► Maßnahmenbündel 1B

1. Themenbereich: Rahmenbedingungen
2. Zielbeitrag: Steigerung der Ressourceneffizienz (durch verbesserte Bedingungen für Umsetzung von Ressourcenschutzmaßnahmen)
3. Zuständiger Akteur: Unternehmen, Shareholder & Investoren

► Maßnahmenbündel 2A

1. Themenbereich: Reststoff- und Abfallverwertung sowie Verwertung und Aufbereitung von Schlacken und Stäuben
2. Zielbeitrag: Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe, Recycling von bisher ungenutzten Abfällen
3. Zuständiger Akteur: Primär: Industrie, Sekundär: Wissenschaft

► Maßnahmenbündel 2B

1. Themenbereich: Reststoff- und Abfallverwertung sowie Verwertung und Aufbereitung von Schlacken und Stäuben
2. Zielbeitrag: Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe, Recycling von bisher ungenutzten Abfällen
3. Zuständiger Akteur: Politik / Behörden

► Maßnahmenbündel 3

- Themenbereich: Energienutzung und -erzeugung & Gebäudegestaltung
- Zielbeitrag: Einsatz erneuerbarer Energien zur dezentralen Stromversorgung der Unternehmen, Substitution von fossilen Brennstoffen und Reduktionsmitteln
- Zuständiger Akteur: Industrie

► Maßnahmenbündel 4

1. Themenbereich: Produktionstechnik (Metallurgie, Gießertechnik, Hoch- und Schmelzöfen, Brennersysteme)
2. Zielbeitrag: Steigerung der Ressourceneffizienz
3. Zuständiger Akteur: Industrie

5.2.1 Maßnahmenbündel 1A

Tabelle 43: Maßnahmenbündel 1A

Themenbereich	Rahmenbedingungen
Zuständiger Akteur	Politik / Behörden
Zielbeitrag	Steigerung der Ressourceneffizienz (durch verbesserte Bedingungen für Umsetzung von Ressourcenschutzmaßnahmen)
Einzelmaßnahmen/ Bausteine	Abgleich von widersprüchlichen Regelungen im Chemikalienrecht Verbesserung der Investitionsanreize für Energie- und Ressourceneffizienzmaßnahmen Anpassung der Gesetzgebung, so dass verhindert wird, dass durch Energieeinsparungen die EEG-Befreiung gefährdet wird
Zeitliche Realisierbarkeit	2020 bis 2025

Maßnahmenbündel 1A umfasst Maßnahmen, die die Rahmenbedingungen für die Umsetzung von Ressourcenschutzmaßnahmen betreffen und die eine Aktion von der Politik bzw. den zuständigen Behörden erfordern. Die gesammelten Einzelmaßnahmen zielen auf eine Verbesserung der Rahmenbedingungen für die Investition in Ressourcenschutzmaßnahmen und deren Umsetzung ab. Zum einen werden im Chemikalienrecht Hürden gesehen, die einem gesteigerten Recycling (einschließlich Verwertung und Aufbereitung von Schlacken) im Wege stehen. Insbesondere die Anforderungen aus REACH zur Schadstofffreiheit bzw. Nachweis- und Registrierungspflicht werden von Praktikern als eine Gefahr für die Substitution von Primär- durch Sekundärrohstoffe gesehen. Die Diskussionen im Zukunftsworkshop hat gezeigt, dass auch eine zusätzliche Bereitstellung von Informationen zu den tatsächlich geltenden Anforderungen und Pflichten für die Akteure zu einer Verbesserung der Rahmenbedingungen beitragen kann³.

Die beiden weiteren Einzelmaßnahmen adressieren die ökonomischen Randbedingungen für Investitionen in Energie- und Ressourcenschutz. Hier wird zum einen ein hohes Potenzial in der Verbesserung von Investitionsanreizen von Behördenseite gesehen, bspw. durch zusätzliche Förderung neuer, effizienterer Technologien (Förderung der Markteinführung). Besondere Berücksichtigung sollen im Rahmen der Förderung langfristige Investitionen finden, die sich erst über einen längeren Zeitraum amortisieren. Grundsätzlich hat insbesondere die Diskussion im Workshop jedoch gezeigt, dass nicht primär das Fehlen von Förderprogrammen als Hauptproblem gesehen wird, sondern vielmehr das Fehlen niederschwelliger Fördermöglichkeiten. Die hohen verwaltungstechnischen Hürden derzeitiger Förderprogramme werden insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen als zu hoch angesehen, so dass der zusätzliche Aufwand kaum durch die mögliche Förderung gerechtfertigt wird. Erfahrungen beispielsweise der Ressourceneffizienzagentur NRW zeigen, dass teilweise von Unternehmen auf die Förderung verzichtet wird, um den für die Förderung notwendigen Aufwand zu vermeiden. Hier bietet sich also die Möglichkeit auch bereits ohne zusätzlichen Einsatz finanzieller Mittel, eine Verbesserung der Investitionsbedingungen zu erreichen.

³ Für Kunststoffrecycler gibt es beispielsweise eine entsprechende Handreichung des Umweltbundesamtes: Jepsen et al. (2011): Reach und Kunststoffrecycling – Handreichung für eine sachgerechte Umsetzung der Reachanforderungen für Betreiber von Recyclinganlagen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. UBA-Texte 55/2011.

Zum anderen wird ein hohes Potenzial in der Anpassung der Gesetzgebung gesehen, so dass verhindert wird, dass durch Energieeinsparungen die EEG-Befreiung gefährdet wird. Hier besteht für die betroffenen Praktiker das Problem, dass Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und zur sonstigen Reduktion des Energieverbrauchs zu finanziellen Nachteilen der Unternehmen führen können.

5.2.2 Maßnahmenbündel 1B

Tabelle 44: Maßnahmenbündel 1B

Themenbereich	Rahmenbedingungen und organisatorisch-konzeptionelle Entwicklungen
Zuständiger Akteur	Unternehmen, Shareholder & Investoren
Zielbeitrag	Steigerung der Ressourceneffizienz (durch verbesserte Bedingungen für Umsetzung von Ressourcenschutzmaßnahmen)
Einzelmaßnahmen/ Bausteine	Akzeptanz längerer Amortisationszeiten (>4 Jahre) um innovative Projekte umzusetzen. (bspw. durch grundlegenden Erwartungs- oder Wertewandel hin zu nachhaltigen Investitionen)
Zeitliche Realisierbarkeit	2020 bis 2025

Maßnahmenbündel 1B umfasst wie Maßnahmenbündel 1A solche Maßnahmen, die die Rahmenbedingungen für die Umsetzung von Ressourcenschutzmaßnahmen betreffen. Hier jedoch liegt die Zuständigkeit nicht bei Politik bzw. den zuständigen Behörden, sondern bei den Unternehmen bzw. deren Shareholdern und Investoren selbst. Es wird von den Unternehmen als relevantes Problem gesehen, dass typischer Weise nur solche innovativen Projekte umgesetzt werden, die sich nach spätestens vier Jahren amortisiert haben. Dies resultiert aus den (kurzfristigen) Renditeerwartungen von Anteilseignern und Investoren. Dies führt häufig zur Forderung, dass innovative Projekte, die zur Ressourcenschonung beitragen, zusätzlich von der öffentlichen Hand gefördert werden sollten. Dabei stellen sich nicht die fehlende Förderung sondern die Erwartungen der Geldgeber bzgl. kurzfristiger Amortisationen ihrer Investition als eigentliches Problem dar. Ein grundlegender Erwartungs- oder Wertewandel hin zu nachhaltigen Investitionen (mit längeren Amortisationsdauern) würde hier zur Verbesserung der Rahmenbedingungen für Investitionen in innovative Projekte mit Ressourcenschutzbezug beitragen.

5.2.3 Maßnahmenbündel 2A

Tabelle 45: Maßnahmenbündel 2A

Themenbereich	Reststoff- und Abfallverwertung sowie Verwertung und Aufbereitung von Schlacken und Stäuben
Zuständiger Akteur	Primär: Industrie, Sekundär: Wissenschaft
Zielbeitrag	Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe, Recycling von bisher ungenutzten Abfällen
Einzelmaßnahmen/ Bausteine	Optimierte Schrotterfassung und –sortierung Optimierte Erfassung von End-of-Life Produkten Technologische Weiterentwicklung zur Verarbeitung komplexer werdender Sekundärmaterialien; F&E zur Schnittstellenoptimierung Aufbereitung – Metallurgie für (thermodynamisch) komplexe primäre + sekundäre Konzentrate Verbesserte Aufbereitung von Schlacken aus der Primärgewinnung Produktdesign (+ -fertigung) für ein vereinfachtes Recycling („Design-for-Recycling“)

Zeitliche Realisierbarkeit

2020 bis 2025 für Einsatz vorhandener Verfahren und Verfahren mit geringerem Entwicklungsaufwand
 2025 bis 2030 für Maßnahmen mit höherem Entwicklungsaufwand

Maßnahmenbündel 2B fasst solche Maßnahmen der Reststoff- und Abfallverwertung sowie Verwertung und Aufbereitung von Schlacken und Stäuben zusammen, die zur Steigerung der Kreislaufführung von NE-Metallen beitragen. Die Zuständigkeit für die Umsetzung der Maßnahmen liegt hier bei der Industrie sowie der Wissenschaft als relevanter Akteur bzgl. der Entwicklung neuer Verfahren, Prozesse usw. Die einzelnen Maßnahmen setzen an verschiedenen Stellen des Produkt- bzw. Materiallebenszyklus an. Das mit Abstand größte Potenzial wird bei den Maßnahmen zur optimierten EOL-Produkt bzw. Schrotterfassung und -sortierung gesehen, welche die Voraussetzung für eine qualitativ hochwertige stoffliche Rückgewinnung darstellen und zu einer Vermeidung von Downcycling beitragen. Als konkrete Technologien und Verfahren werden hier die Sortierung gemischter Schrotte und EOL Ströme durch Röntgenfluoreszenzanalyse oder laserinduzierte Plasmaspektroskopie genannt. Auch in einer EU-weiten Angleichung des Sammel- und Sortiertechnik werden Chancen gesehen.

Einen Schritte hinter Sammlung und Sortierung setzt die technologische Weiterentwicklung zur Verarbeitung komplexer werdender Sekundärmaterialien an, die eine Vielzahl verschiedener NE-Metalle in zunehmend geringerer Konzentration beinhalten, was aus den komplexer werdenden Produkten resultiert. Bislang kommt es für viele sog. Technologiemetalle zu dissipativen Verlusten am Lebensende und ggf. zur Kontamination von Stoffströmen. Hier wird einerseits eine hohe Dringlichkeit technologischer Weiterentwicklung für ein hochwertigeres Recycling gesehen, andererseits wird unter Ressourcenschutzaspekten ein möglicher Konflikt zwischen gesteigerter Kreislaufführung und zusätzlich notwendigem Energieaufwand befürchtet. Neben der technologischen Weiterentwicklung zur Verarbeitung von Sekundärmaterialien wird auch bei Primärkonzentraten entsprechender Bedarf gesehen (vgl. Maßnahmenbündel 4). Auch in der verbesserten Aufbereitung von Schlacken aus der Primärgewinnung insbesondere in Bezug auf eine Rückgewinnung von Seltenen Erden und anderen NE-Metallen wird ein hohes Potenzial gesehen. Dies betrifft auch die Aufarbeitung von auf Halden etc. angesammelten Produktionsrückständen.

Sowohl für die Primär- als auch die Sekundärproduktion wird dabei die globale Verbreitung der (europäischen) BVT-Standards als wichtiger Punkte angesehen. Zum einen dient dies der Verbreitung von Produktionsverfahren mit reduzierten Emissionen, was dem Umweltschutz dient, zum anderen werden dadurch gleiche Ausgangsbedingungen für die Marktakteure geschaffen.

Ganz am Anfang des Produktlebenszyklus setzt das „Design-for-Recycling“ an, also eine Produktgestaltung die das Recycling vereinfacht. Hierzu zählen typischer Weise Maßnahmen wie die einfache (manuelle oder automatisierte) Separierbarkeit besonders werthaltiger Komponenten (bspw. Leiterplatten, Batterien, Halbleiterschichten usw.) und die leichte Demontierbarkeit von Komponenten aus verschiedenen (und für das Recycling nicht kompatiblen) Werkstoffen.

5.2.4 Maßnahmenbündel 2B

Tabelle 46: Maßnahmenbündel 2B

Themenbereich	Reststoff- und Abfallverwertung sowie Verwertung und Aufbereitung von Schlacken und Stäuben
Zuständiger Akteur	Politik / Behörden
Zielbeitrag	Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe, Recycling von bisher ungenutzten Abfällen

Einzelmaßnahmen/ Bausteine	Mehr und bessere Kontrolle von Abfall Im- und Exporten; Vermeidung illegaler Exporte, bessere Überwachung von Rückflüssen Anforderungen an Design-for-Recycling Forschungs- und Investitionsförderung zu den Einzelmaßnahmen aus Maßnahmenbündel 2A
Zeitliche Realisierbarkeit	±2025

Maßnahmenbündel 2B umfasst Maßnahmen zur Reststoff- und Abfallverwertung sowie Verwertung und Aufbereitung von Schlacken und Stäuben zusammen, die zur Steigerung der Kreislaufführung von NE-Metallen beitragen und für die die Zuständigkeit zur Umsetzung bei der Politik bzw. den Behörden liegt. Als eine ganz wesentliche Maßnahme wird die verstärkte und bessere Kontrolle von Abfallexporten mit dem Ziel der Vermeidung illegaler Exporte genannt. Dies betrifft insbesondere Elektro- und Elektronikaltgeräte sowie Altfahrzeuge. Neben der Beweislastumkehr wurden intensivere Kontrollen durch den Zoll und verstärkte Öffentlichkeitsarbeit als konkretere Schritte benannt.

Wie bereits in Maßnahmenbündel 2A beschrieben, liegt ein großes Potenzial im Design-for-Recycling. Auf politischer Ebene können verschärfte Anforderungen an das recyclinggerechte Produktdesign gestellt werden. Dies kann im Rahmen der Ökodesignrichtlinie geschehen, welche für energieverbrauchsrelevante Produkte den Marktzugang regelt, aber auch durch freiwillige Umweltzeichen wie den Blauen Engel oder das EU-Ecolabel.

Zur Unterstützung der in Maßnahmenbündel 2A genannten F&E Bedarfe, stellt die öffentliche Forschungsförderung eine wichtige Maßnahme dar. Hier wurde insbesondere die Förderung des Upscaling von Maßnahmen genannt, die bereits im Labormaßstab vorliegen. Neben der eigentlichen Forschungsförderung wird ein mindestens ebenso großes Potenzial in der Förderung der Umsetzung, also dem Transfer in die Praxis, von bereits vorhandenen Ansätzen gesehen.

5.2.5 Maßnahmenbündel 3

Tabelle 47: Maßnahmenbündel 3

Themenbereich	Energienutzung und –erzeugung & Gebäudegestaltung
Zuständiger Akteur	Industrie
Zielbeitrag	Einsatz erneuerbarer Energien zur dezentralen Stromversorgung der Unternehmen, Substitution von fossilen Brennstoffen und Reduktionsmitteln
Einzelmaßnahmen/ Bausteine	Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien: Lastmanagement zur Nutzung von überschüssigem EE-Strom Einsatz dezentraler erneuerbarer Energie (z.B. BHKW, Windenergie) Gebäudegestaltung zur Optimierung von Heizung und Lüftung Industrial Symbiosis: Nutzung der Vorteile von Systemverbänden (Nutzung von Abwärme in Industrieparks etc.) Prozessinterne Wärmerückführung Externe Abwärmennutzung
Zeitliche Realisierbarkeit	±2025

Maßnahmenbündel 3 fasst die Einzelmaßnahmen des Themenbereichs Energienutzung und –erzeugung sowie Gebäudegestaltung zusammen, die zu einem Umstieg auf erneuerbare Energien und zur Reduktion des Energieverbrauches beitragen.

Ganz grundsätzlich zählt hierzu die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien in Verbindung mit einem Lastmanagement zur Nutzung von überschüssigem EE-Strom. Diesbezüglich werden jedoch

große finanzielle Herausforderungen gesehen. Ergänzend hierzu wird in der eigenen, dezentralen Erzeugung von erneuerbaren Energien (bspw. Windenergie, BHKW, Photovoltaik) ein großes Potenzial gesehen. Manche Akteure sehen dabei in BHKW und PV ein höheres Potenzial, da weniger unregelmäßige Schwankungen in der Erzeugung auftreten. Als problematisch werden dabei die langen Amortisationszeiten angesehen, die bereits in Maßnahmenbündel 1A und 1B adressiert wurde.

Eine Reduktion des Energieverbrauchs kann durch prozessinterne Wärmerückgewinnung sowie eine optimierte Gebäudegestaltung, die zur Optimierung von Heizung und Lüftung beiträgt, erreicht werden. Einzuschränken hierbei ist, dass dies häufig nur bei Neubauten wirtschaftlich umsetzbar ist bzw. die langen Amortisationszeiten zu beachten sind.

Verschiedene Einzelmaßnahmen mit hohem Potenzial lassen sich unter dem Begriff der Industrial Symbiosis zusammenfassen. Hierbei geht es darum die Vorteile von Systemverbänden zu nutzen. In Bezug auf Energieverbrauch zielt dies in erster Linie auf eine (externe) Nutzung von Abwärme ab. Möglichkeiten kann die Nutzung als Prozesswärme in nahegelegenen produzierenden Betrieben sein. Alternativ stellt auch die Nutzung als Heizwärme für Gewerbe oder Siedlungen eine Möglichkeit dar.

5.2.6 Maßnahmenbündel 4

Tabelle 48: Maßnahmenbündel 4

Themenbereich	Produktionstechnik (Metallurgie, Gießereitechnik, Hoch- und Schmelzöfen, Brennersysteme)
Zuständiger Akteur	Industrie
Zielbeitrag	Steigerung der Ressourceneffizienz
Einzelmaßnahmen/ Bausteine	Technologische Weiterentwicklung zur Verarbeitung komplexer werdender Konzentrate (Schwermetallgehalte, Gehalte sonstiger Elemente) Industrie 4.0 Optimierter Brennereinsatz
Zeitliche Realisierbarkeit	2020-2025

Maßnahmenbündel 4 fasst die Maßnahmen zusammen, die dem Themenbereich Produktionstechnik zuzuordnen sind und die in erster Linie zur Steigerung der Ressourceneffizienz beitragen.

Bereits in Maßnahmenbündel 2A und 2B genannt ist die technologische Weiterentwicklung zur Verarbeitung komplexer werdender Konzentrate (hier nur primär in Abgrenzung zum Recycling). Daneben wird ein hohes Potenzial in den Entwicklungen hin zu Industrie 4.0, also der Verzahnung der industriellen Produktion mit modernster Informations- und Kommunikationstechnik, gesehen.

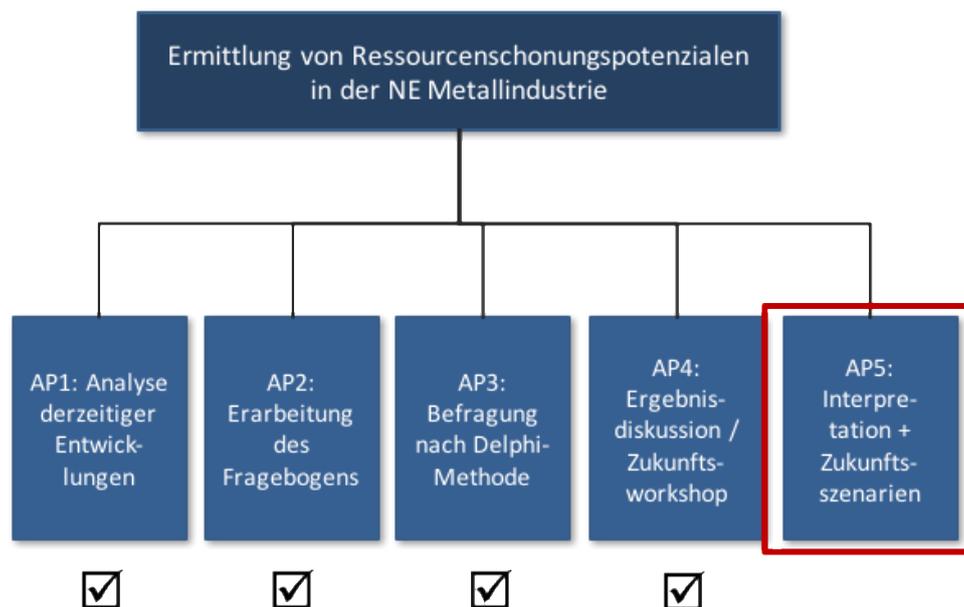
Eine weitere produktionstechnische Maßnahme ist der optimierte Brennereinsatz (Hoch- und Schmelzöfen etc.). Dies umfasst konkret die optimierte Steuerung vorhandener Brenner sowie den Einsatz alternativer Brennertechnologien (Rekuperations- oder Regenerativbrenner, flammlose Brenner). Wiederum wird die Höhe der notwendigen Investition und die lange Amortisationsdauer als Problem gesehen. Im Zuge von Neubauten oder ohnehin stattfindenden Großreparaturen kann ein Austausch der Brennertechnologie hingegen wirtschaftlich attraktiver sein.

6 Ermittlung von Rahmenbedingungen und Konsequenzen im Szenarienworkshop

Der Szenarienworkshop in Berlin und das vorbereitende Treffen in Hanau hatten zum Ziel, Zukunftsbilder für eine ressourcenschonende NE-Metallindustrie zu entwerfen, in denen später die Maßnahmen für eine Umsetzung eingepasst werden können. Dafür wurden zentrale interne und externe Einflussfaktoren identifiziert und in eine konsistente Beschreibung von Zukunftsbildern überführt. Für die Einflussfaktoren wurden dann zukünftige Ausprägungsvarianten diskutiert und in Form von Zukunftsprojektionen zusammengefasst. Um der inhärenten Unsicherheit beim Szenariementwurf Rechnung zu tragen, wurden zusätzlich Ereignisse und Entwicklungen identifiziert, die einen disruptiven Einfluss auf die angenommenen Projektionen haben könnten, sogenannte „wild cards“.

Dieser Workshop repräsentiert den abschließenden Baustein für die Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen in der NE-Metallindustrie und die Ableitung dafür notwendiger Maßnahmen. Diese Einordnung in das Gesamtprojekt ist nochmals in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

Abbildung 42: Einordnung des Szenarienworkshops in das Gesamtprojekt



6.1 Zielsetzung und Methodik

Folgende konkrete Ziele lassen sich für den Szenarienworkshop benennen:

- ▶ Entwicklung von Zukunftsbildern (Szenarien)
- ▶ Beschreibung: treibende Kräfte für Maßnahmen (interne Treiber/Einflussfaktoren) (Chancen und Risiken, Roadmap-Architektur für Mainstream/Understream, ggf. auch FuE-Vorhaben initiieren, Demo- und Pilotprojekte)
- ▶ Diskussion und Auswahl externer Einflussfaktoren
- ▶ Identifikation von Wild Cards.

Das methodische Vorgehen im Workshop richtet sich nach der Szenariotechnik (Reibnitz et al. 1982). Die Ziele und die notwendigen methodischen Schritte zu Ihrer Erreichung sind in den nächsten Abbildungen beschrieben.

Abbildung 43: Begriffe und Konzepte zur Erarbeitung von Szenarien

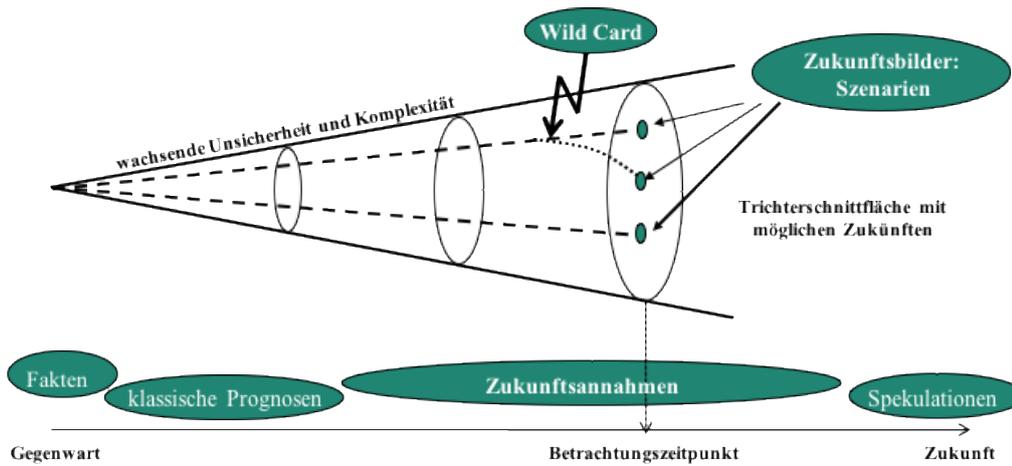
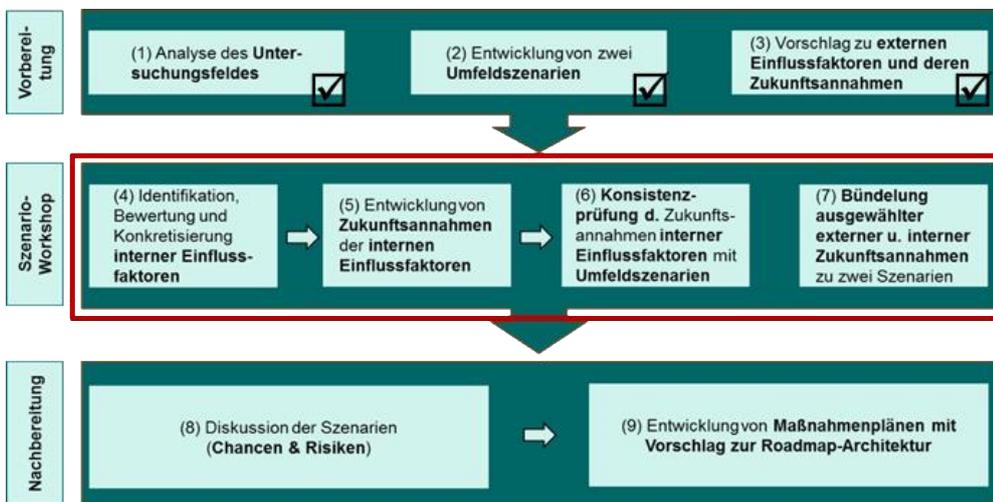


Abbildung 44: Schritte zur Erarbeitung von Szenarien in DelphiNE (rot: Workshoparbeit)



6.2 Bestimmung, Konkretisierung und Bewertung interner Einflussfaktoren

Die Vorgaben für die Erarbeitung der internen Einflussfaktoren ergeben sich aus den auf Basis des Zukunftsworkshops erarbeiteten Maßnahmenbündeln (vgl. Abschnitt 5.2). Hierauf aufbauend wurde dann zunächst ungeordnet interne Einflussfaktoren gesammelt, die dann zu sieben übergreifenden Kategorien von internen Treibern zusammengefasst wurden (siehe Tabelle 49).

Tabelle 49: Interne Einflussfaktoren für Maßnahmen zur Ressourcenschonung

Interne Einflussfaktoren	Spezifizierung bzw. Unterfaktoren
Innovationsklima	<ul style="list-style-type: none"> • Finanzielle Bereitschaft für F&E (und Risiken) • Verfügbarkeit von F&E Ressourcen und Innovationspolitik • Erwartung an Rendite und Amortisation für Investitionen • Innovationsgetriebene Unternehmensführung • Komplexe Produkte und Aufwand für Sortierung • Höhere Priorität für F&E in Unternehmen • Professionelles Innovationsmanagement in Unternehmen • Innovationsmodell • Innovations- und Forschungskultur in Unternehmen

	<ul style="list-style-type: none"> • Austausch und Kooperation innerhalb der Branche • Erlöserhöhung und Verbesserung der Ausbeuten • Erweiterung / Sicherung der Rohstoffbasis • Sicherung der Versorgung mit Rohstoffen und Energie • Wärmenetze und Abnehmerstruktur in der Nähe zu Industrieanlagen
Nachhaltigkeitsstrategie	<ul style="list-style-type: none"> • Nachhaltigkeitsstrategie und Kultur im Unternehmen
Bürokratie	<ul style="list-style-type: none"> • Normung zu langfristig → Kein Marktzugang und Widerstand Dritter • Zulassungsordnung für Produkte starr / zu langfristig
Wertschöpfungsstrategie	<ul style="list-style-type: none"> • Geschäftsmodelle • Optimierung von Wertschöpfungsketten • Systemanbieter statt Produkthersteller • Kooperation mit Kunden zu innovativen Produkten • Antizipation sich wandelnder Kundenanforderungen
Personalstrategie	<ul style="list-style-type: none"> • Bürokratieaufwand für Fördermaßnahmen zu hoch (gehört ggf. auch oben zu Bürokratie) • Bewusstseinsbildung bei Mitarbeitern für Ressourceneffizienz fördern • Wenig Zeit für wertschöpfungsübergreifendes Denken • Personalstrategie: Rekrutierung, Aus-/Fortbildung, Information, Motivation
Gesellschaftspolitische Positionierung	<ul style="list-style-type: none"> • Industriestandards zur Nachhaltigkeit (z.B Aluminium Stewardship Initiative) • Externe Wahrnehmung des Unternehmens • Gesetzeskonformität des Unternehmens, auch: Vorwegnahme
Digitalisierung	<ul style="list-style-type: none"> • Digitalisierung der Produktion

6.3 Diskussion und Auswahl externer Einflussfaktoren

Im nächsten Schritt erfolgte die Diskussion und Auswahl relevanter externer Einflussfaktoren. Hierbei wurden auch die Ergebnisse eines Screening-Prozesses berücksichtigt. Dieser beruht auf einer Auswahl einschlägiger Szenarienentwürfe des Umweltbundesamtes (siehe Abbildung 45).

Abbildung 45: Basis für die Vorauswahl der externen Treiber (vier Szenarienstudien des Umweltbundesamtes)

- Zur Entwicklung der Zukunftsbilder für die NE-Metallindustrie mit Planungshorizont 2030 in „DelphiNE“ wurden einschlägige UBA-Zukunftsstudien ausgewertet.

Zunächst haben die Workshopteilnehmer externe Einflussfaktoren gesammelt, diese dann in Gruppenarbeit sortiert, ergänzt und in eine strukturierte Liste überführt. Das Ergebnis ist in Tabelle 50 wiedergegeben.

Tabelle 50: Externe Einflussfaktoren für Maßnahmen zur Ressourcenschonung

Externe Einflussfaktoren	Spezifizierung bzw. Unterfaktoren
Staatliche Förderung und Anreizsetzung	(keine Unterfaktoren zugeordnet)
Globale Nachfrage und Konsum	<ul style="list-style-type: none"> Individuelle Kundenanforderungen → Losgrößen kleiner und spezieller Kundenspezifikationen (Material und Unternehmen)
Bevölkerungsentwicklung und Fachkräftemangel	(keine Unterfaktoren zugeordnet)
Energie- und Rohstoffpreise	<ul style="list-style-type: none"> Energiekosten Nationale Ressourcenstrategie Regulierung von Teilströmen
Globale Metallmärkte	<ul style="list-style-type: none"> Verfügbarkeit und Komplexität der Einsatzmaterialien Verunreinigungsgehalte Weniger Produktentwicklung wg. Marktdruck
Umwelt-, Energie- und Ressourcenschutzgesetzgebung	<ul style="list-style-type: none"> Sicherheitsauflagen Standards und Zertifizierungssysteme für Recyclingverfahren Netzentgelte-Regulierung und Umlage (für flexible Lasten) Verpflichtung zur externen Stoffstromtransparenz bei primären und sekundären Lieferketten (inkl. end-of-life)

6.4 Entwicklung von Zukunftsprojektionen für die internen und externen Einflussfaktoren

Im nächsten Schritt wurden zu den oben gefundenen internen und externen Einflussfaktoren entsprechende mögliche Ausprägungen in der Zukunft bestimmt. Diese stellen einen Ausgangspunkt für eine spätere Entwicklung konsistenter Szenarien und die Bestimmung von Roadmaps dar.

Das Ergebnis der Expertendiskussion zu den Ausprägungen ist in Tabelle 51 wiedergegeben. Für jeden Faktor, extern oder intern, wurde jeweils einmal die Ist-Situation beschrieben, sowie 2-3 mögliche zukünftigen Ausprägungen.

Tabelle 51: Ausprägungsvarianten der Einflussfaktoren

Einflussfaktor	Ist-Situation	Ausprägung A	Ausprägung B	Ausprägung C
Staatliche Förderung und Anreizsetzung	<ul style="list-style-type: none"> • Bürokratisch • Unübersichtlich und intransparent • Zeitfaktor / zu langsam 	<ul style="list-style-type: none"> • Maßgeschneidert 	<ul style="list-style-type: none"> • Bleibt gleich 	<ul style="list-style-type: none"> • Wird reduziert
Globale Nachfrage und Konsum	<ul style="list-style-type: none"> • Mittelmäßig relativ zu Vorjahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachfrage bleibt konstant 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachfrage steigt 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachfrage schwankt
Bevölkerungsentwicklung und Fachkräftemangel	<ul style="list-style-type: none"> • Fachkräftemangel vorhanden • Überalterte Gesellschaft im Berufsleben 	<ul style="list-style-type: none"> • Fachkräftemangel bleibt konstant • Überalterung im Berufsleben bleibt erhalten 	<ul style="list-style-type: none"> • Fachkräftemangel reduziert (=Verbesserung) • Überalterung im Berufsleben nimmt ab 	(keine Ausprägung C)
Energie- und Rohstoffpreise	<ul style="list-style-type: none"> • Rohstoffpreise derzeit niedrig • Energiepreise derzeit hoch 	<ul style="list-style-type: none"> • Stark steigend • Anstieg in D, EU, global unterschiedlich stark 	<ul style="list-style-type: none"> • Zyklus (der Rohstoffpreise) • Globale Harmonisierung 	(keine Ausprägung C)
Globale Rohstoff- und Metallmärkte⁴	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit: gut • Handelshemmnisse: vorhanden • Nachfrage: mittel/hoch 	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit: gut • Handelshemmnisse: Zunahme • Nachfrage: steigt 	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit: Abnahme • Handelshemmnisse: Abnahme (wg. z.B. TTIP) • Nachfrage: sinkt 	(keine Ausprägung C)
Umwelt-, Energie- und	<ul style="list-style-type: none"> • Emissionsauflagen: hoch + Verzerrungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Emissionsauflagen: Zunahme + Verzerrungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Emissionsauflagen: EU Harmonisierung 	(keine Ausprägung C)

⁴ Einflussfaktor wurde gegenüber ursprünglicher Fassung in der Diskussion erweitert

Ressourcenschutzgesetzgebung	<ul style="list-style-type: none"> • Politische Zusatzkosten: hoch + Verzerrungen • Stoffverbote und Zulassungen: vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> • Politische Zusatzkosten: Zunahme + Verzerrungen • Stoffverbote und Zulassungen: Zunahme (wg. Eigenschaften) 	<ul style="list-style-type: none"> • Politische Zusatzkosten: EU Harmonisierung • Stoffverbote und Zulassungen: Risikobasiert 	
Innovationsklima	<ul style="list-style-type: none"> • Innovation als Mittel zur Effizienzsteigerung: wird noch nicht flächendeckend erkannt, gefördert und gefordert 	<ul style="list-style-type: none"> • Flächendeckende Innovationsförderung für Effizienz 	<ul style="list-style-type: none"> • Innovationsförderung für Effizienz verliert an Bedeutung 	(keine Ausprägung C)
Nachhaltigkeitsstrategie	<ul style="list-style-type: none"> • Nachhaltigkeitsstrategie im Unternehmen verankert (sichert langfristiges Bestehen des Unternehmens): Noch nicht durchgängig eingeführt 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachhaltigkeitsstrategie im Unternehmen verankert: Flächendeckend eingesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachhaltigkeitsstrategie im Unternehmen: Nachhaltigkeitsgedanke verliert an Bedeutung 	(keine Ausprägung C)
Bürokratie	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwand der Zulassung neuer Produkte: groß • Einfluss auf Produktinnovation: negativ 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwand der Zulassung neuer Produkte: sinkt • Einfluss auf Produktinnovation: positiv 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwand der Zulassung neuer Produkte: bleibt gleich • Einfluss auf Produktinnovation: keine 	(keine Ausprägung C)
Wertschöpfungsstrategie	<ul style="list-style-type: none"> • Systemlösungen bestehen in Nischen 	<ul style="list-style-type: none"> • Ressourcenschonende Kooperationen entlang von Wertschöpfungsketten in allen NE-Sektoren 	<ul style="list-style-type: none"> • Abschottung von Elementen der Wertschöpfungsketten, Fokus auf Kernprodukte 	(keine Ausprägung C)
Personalstrategie	<ul style="list-style-type: none"> • Existierender Fachkräftemangel, aber 	<ul style="list-style-type: none"> • Hochmotivierte Mitarbeiter in Betrieben und ausreichendes 	<ul style="list-style-type: none"> • Eklatanter Fachkräftemangel und schlechte Ar- 	(keine Ausprägung C)

	funktionierende interne Weiterbildung	Bildungsangebot	beits- und Weiterentwicklungsbedingungen	
Gesellschaftspolitische Positionierung	<ul style="list-style-type: none"> Größtenteils bestehende Positionierung mit sehr heterogenem Umsetzungsprofil 	<ul style="list-style-type: none"> Vorausschauende Umsetzung von Regulierungen und gesellschaftlichen Ansprüchen 	<ul style="list-style-type: none"> Reagieren statt agieren (auf gesellschaftliche Ansprüche) 	(keine Ausprägung C)
Digitalisierung der Produktion	<ul style="list-style-type: none"> Heterogene Durchdringung und unklare Wirkung auf Ressourcenschonung 	<ul style="list-style-type: none"> Maximale Transparenz und resultierende Ressourcenschonung 	<ul style="list-style-type: none"> Kleinstmengenproduktion (ineffizient) und Verfehlung der Flexibilitäts- und Transparenzziele 	(keine Ausprägung C)

6.5 Sammlung von „wild cards“

Um die aus den beschriebenen Treibern zu entwickelnden Szenarien weiter anzureichern, wurden die TeilnehmerInnen gebeten, mögliche aber aus derzeitiger Sicht unwahrscheinliche Ereignisse („wild cards“) zu definieren, die sowohl in positiver als auch negativer Hinsicht die Erreichung der Ressourcenschonungsziele beeinflussen könnten. Die identifizierten Wild Cards sind in Tabelle 52 zusammengefasst.

Tabelle 52: Im Zukunftsworkshop identifizierte Wild Cards

Energie	Material	Technik	Regulierung	Sonstige
Dauerhaft niedrige Rohstoff- und Metallpreise	Dauerhaft niedrige Rohstoff- und Metallpreise	Disruptive Innovationen (technische Entwicklungssprünge)	„Beste Verfügbare Technik“ weltweit umgesetzt	Freihandelsabkommen (z.B. TTIP)
Energieverknappung durch globale Konflikte	Steigerung Schrottaufkommen China: Minderung des dt. Schrottexports, weniger Primärerzeugung nötig	Substitution von NE-Metallen durch andere Werkstoffe	Globales verbindliches Abkommen zur Ressourcenschonung	Rückkehr zur Nationalstaatlichkeit (Scheitern der EU)
(-)	(-)	(-)	Aufhebung Depo- nierverbot	Erwartungen an Rendite und Amortisationszeit

6.6 Bewertung der Erwartbarkeit von Ausprägungsalternativen

Um im Nachgang sinnvolle Unterscheidungen zwischen erwartbaren und weniger erwartbaren Szenarien machen zu können, wurden die Teilnehmer gebeten, jeweils eine der Ausprägungen durch Punktmarkierung als die ihrer Meinung nach wahrscheinlichere zu kennzeichnen. Für die spätere Ausformulierung von konkreten Szenarien kann diese Bewertung herangezogen werden um die im Rahmen der Konsistenzanalyse abgeleiteten „Mainstream“ und „Understream“ Szenarien um eine Erwartbarkeitseinschätzung zu ergänzen.

Das Ergebnis ist hier mit in Tabellenform wiedergegeben.

Tabelle 53: Ergebnisse der Bewertung: Wahrscheinlichkeit von Ausprägungsalternativen

Einflussfaktor	Ausprägung A	Ausprägung B	Ausprägung C
Staatliche Förderung und Anreizsetzung	<ul style="list-style-type: none"> • Maßgeschneidert (-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bleibt gleich (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Wird reduziert
Globale Nachfrage und Konsum	<ul style="list-style-type: none"> • Nachfrage bleibt konstant (-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachfrage steigt (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachfrage schwankt
Bevölkerungsentwicklung und Fachkräftemangel	<ul style="list-style-type: none"> • Fachkräftemangel bleibt konstant (~) • Überalterung im Berufsleben bleibt erhalten (~) 	<ul style="list-style-type: none"> • Fachkräftemangel reduziert (=Verbesserung) (~) • Überalterung im Berufsleben nimmt ab (~) 	(keine Ausprägung C)
Energie- und Rohstoffpreise	<ul style="list-style-type: none"> • Stark steigend (-) • Anstieg in D, EU, global unterschiedlich stark (-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Zyklus (der Rohstoffpreise) (+) • Globale Harmonisierung (+) 	(keine Ausprägung C)
Globale Rohstoff- und Metallmärkte	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit: gut (+) • Handelshemmnisse: Zunahme (+) • Nachfrage: steigt (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit: Abnahme (-) • Handelshemmnisse: Abnahme (wg. z.B. TTIP) (-) • Nachfrage: sinkt (-) 	(keine Ausprägung C)
Umwelt-, Energie- und Ressourcenschutzgesetzgebung	<ul style="list-style-type: none"> • Emissionsauflagen: Zunahme + Verzerrungen (-) • Politische Zusatzkosten: Zunahme + Verzerrungen (-) • Stoffverbote und Zulassungen: Zunahme (wg. Eigenschaften) (-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Emissionsauflagen: EU Harmonisierung (+) • Politische Zusatzkosten: EU Harmonisierung (+) • Stoffverbote und Zulassungen: Risikobasiert (+) 	(keine Ausprägung C)
Innovationsklima	<ul style="list-style-type: none"> • Flächendeckende Innovationsförderung für Effizienz (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Innovationsförderung für Effizienz verliert an Bedeutung (-) 	(keine Ausprägung C)
Nachhaltigkeitsstrategie	<ul style="list-style-type: none"> • Nachhaltigkeitsstrategie im Unternehmen verankert: Flächendeckend eingesetzt (-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachhaltigkeitsstrategie im Unternehmen: Nachhaltigkeitsgedanke verliert an Bedeutung (+) 	(keine Ausprägung C)

Bürokratie	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwand der Zulassung neuer Produkte: sinkt (+) • Einfluss auf Produktinnovation: positiv (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwand der Zulassung neuer Produkte: bleibt gleich (-) • Einfluss auf Produktinnovation: keine (-) 	(keine Ausprägung C)
Wertschöpfungsstrategie	<ul style="list-style-type: none"> • Ressourcenschonende Kooperationen entlang von Wertschöpfungsketten in allen NE-Sektoren (-) 	<ul style="list-style-type: none"> • Abschottung von Elementen der Wertschöpfungsketten, Fokus auf Kernprodukte (+) 	(keine Ausprägung C)
Personalstrategie	<ul style="list-style-type: none"> • Hochmotivierte Mitarbeiter in Betrieben und ausreichendes Bildungsangebot (~) 	<ul style="list-style-type: none"> • Eklatanter Fachkräftemangel und schlechte Arbeits- und Weiterentwicklungsbedingungen (~) 	(keine Ausprägung C)
Gesellschaftspolitische Positionierung	<ul style="list-style-type: none"> • Vorausschauende Umsetzung von Regulierungen und gesellschaftlichen Ansprüchen (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Reagieren statt agieren (auf gesellschaftliche Ansprüche) (-) 	(keine Ausprägung C)
Digitalisierung der Produktion	<ul style="list-style-type: none"> • Maximale Transparenz und resultierende Ressourcenschonung (+) 	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinstmengenproduktion (ineffizient) und Verfehlung der Flexibilitäts- und Transparenzziele (-) 	(keine Ausprägung C)

Ein plus (+) signalisiert die jeweils als wahrscheinlichste Variante gewählte Ausprägung, ein minus (-) die jeweils als unwahrscheinlichste gewählte. Ein (~) heißt, es gab keine wahrscheinlichste Ausprägung.

6.7 Wechselwirkungsanalyse und Ableitung von konsistenten Szenarien

Die im Szenarienworkshop ermittelten Treiber und ihre Ausprägungen sind nicht voneinander unabhängig. Damit sind die Kombinationen von Treiberausprägungen in einem Szenario nicht frei wählbar, sondern sie unterliegen vielmehr spezifischen Konsistenzbedingungen. Als Methode zur Prüfung der Konsistenz wurde hier die bewährte Cross-Impact-Bilanz Analyse gewählt (Weimer-Jehle 2006 und 2015). Um konsistente Szenarien zu erstellen, müssen zunächst alle Abhängigkeiten in einer Wechselwirkungsmatrix erfasst und bewertet werden. Ein Beispiel für eine solche Wechselwirkung ist in Abbildung 46 gegeben, wobei die Wechselwirkungen von den Autoren auf einer Skala von -3 (stark schwächerer Einfluss) bis +3 (stark verstärkender Einfluss) bewertet wurden. Die Zusammenfassung aller Wechselwirkungen ist in Abbildung 47 dargestellt. Für den Fall, dass keine Wechselwirkungen erkennbar waren, wurde der Wert 0 eingesetzt.

Abbildung 46: Einfluss von Treiber B (Globale Nachfrage und Konsum) auf Treiber D (Energie und Rohstoffpreise)

Cross-Impacts:			
B. Globale Nachfrage und Konsum:	D. Energie- und Rohstoffpreise:		
	Stark steigend aber global unterschiedlich		
	Rohstoffpreise zyklisch und global harmonisiert		
Nachfrage bleibt konstant	<table border="1"><tr><td>-2</td><td>-1</td></tr></table>	-2	-1
-2	-1		
Nachfrage steigt	<table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td></tr></table>	2	1
2	1		
Nachfrage schwankt	<table border="1"><tr><td>-1</td><td>2</td></tr></table>	-1	2
-1	2		

Erläuterungen zur Einflussbeziehung: Steigende globale Nachfrage nach Gütern wirkt sich auch auf Rohstoffpreise aus (positiv korreliert) Schwankende Nachfrage und zyklisches Marktgeschehen sind wechselseitige Verstärker, d.h. bedingen sich gegenseitig. Auch eine einfach steigende Nachfrage kann bereits zu zyklischen Bewegungen führen, ist aber nicht der einzige Treiber, daher Korrelation schwächer ausgeprägt. Beeinflussung auf Harmonisierungsgrad sind nicht erkennbar.

Mithilfe der Software ScenarioWizard, entwickelt vom Team um Weimer-Jehle an der Universität Stuttgart, wurden die konsistenten Szenarien ermittelt. Die Software simuliert dabei alle möglichen Treiberkonstellationen und bemisst die Konsistenz der daraus resultierenden Szenarien. Am Ende des Prozesses bleiben in der Regel wenige konsistente, also völlig widerspruchsfreie Szenarien übrig. In unserem Fall waren das genau fünf solche Szenarien, siehe Abbildung 48.

Abbildung 47: Wechselwirkungsmatrix alle Treiberausprägungen

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	A1 A2 A3	B1 B2 B3	C1 C2	D1 D2	E1 E2	F1 F2	G1 G2	H1 H2	I1 I2	J1 J2	K1 K2	L1 L2	M1 M2
A. Staatliche Förderung und Anreizsetzung													
Maßgeschneidert				-1 0	0 0	-2 2	3 -3	2 -2	1 -1	1 -1	1 -1	1 -1	1 -1
Bleibt gleich		0 0 0	1 0	0 0	0 0	0 0	-1 1	1 -1	-1 1	0 0	0 0	0 0	0 0
Wird reduziert		-1 1 0	1 -1	1 0	0 0	1 -1	-2 3	-2 2	-1 1	-1 1	-1 1	-1 1	-1 1
B. Globale Nachfrage und Konsum													
Nachfrage bleibt konstant	0 1 -1		0 0	-2 -1	1 -1	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
Nachfrage steigt	1 -1 -2		0 0	2 1	2 -2	0 0	1 -1	0 0	0 0	0 0	1 -1	0 0	1 -1
Nachfrage schwankt	1 0 0		0 0	-1 2	-1 1	0 0	0 0	0 0	0 0	-1 1	-1 1	0 0	0 1
C. Bevölkerungsentwicklung und Fachkräftemangel													
Fachkräftemangel und Überalterung konstant	0 0 0	0 0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	-2 2	0 0	-1 0
Fachkräftemangel und Überalterung reduziert	0 0 0	0 0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	1 0	1 -2	0 0	1 0
D. Energie- und Rohstoffpreise													
Stark steigend aber global unterschiedlich	0 -1 1	-2 -3 0	0 0		1 -1	-1 0	2 -2	2 -2	0 0	2 -2	0 0	1 -1	2 -2
Rohstoffpreise zyklisch und global harmonisiert	0 0 0	-1 0 1	0 0		0 0	0 0	1 -1	0 0	0 0	1 -1	0 0	0 0	1 -1
E. Globale Rohstoff- und Metallmärkte													
Hohe Verfügbarkeit + Handel gehemmt + Nachfrage steigt	1 0 0	-1 2 -1	0 0	2 -2	0 0	0 0	1 -1	0 0	0 0	1 0	0 0	0 0	0 0
Abnehmende Verfügbarkeit + Handel frei + Nachfrage sinkt	0 0 1	-1 -2 -1	0 0	-1 0	0 0	0 0	1 -1	0 0	0 0	1 0	0 0	0 0	0 0
F. Umwelt- Energie- und Ressourcenschutzgesetzgebung													
Hohe Emissionsauflagen mit Verzerrung + Hohe Zusatzkosten + Zunehmende Stoffverbote	0 0 0	0 0 0	0 0	0 0	-1 0	0 0	0 0	1 -1	-2 2	-1 1	0 0	1 -1	0 0
Emissionsauflagen harmonisiert + Zusatzkosten harmonisiert + Stoffverbote risikobasiert	0 0 0	0 0 0	0 0	0 0	0 1	0 0	0 0	-1 1	2 -2	1 -1	0 0	0 0	0 0
G. Innovationsklima													
Flächendeckende Innovationsförderung für Effizienz	2 -1 -2	0 0 0	0 0	0 0	0 0	0 0		1 -1	1 -1	1 0	1 -1	1 -1	1 -1
Innovationsförderung für Effizienz verliert an Bedeutung	-2 -1 2	0 0 0	0 0	0 0	0 0	0 0		-1 1	-1 1	-1 0	-1 1	-1 1	-1 1
H. Nachhaltigkeitsstrategie													
Nachhaltigkeitsstrategie flächendeckend verankert	1 1 0	0 0 0	0 0	0 0	0 0	-1 1	-1 1		1 -1	2 -1	1 -1	2 -2	1 -1
Nachhaltigkeitsgedanke verliert an Bedeutung	2 -1 -2	0 0 0	0 0	0 0	0 0	1 -1	1 -1		-1 1	1 -2	-1 1	-2 2	-1 1
I. Bürokratie													
Zulassungsaufwand neuer Produkte sinkt + positiver Einfluss auf Innovation	0 1 0	0 0 0	0 0	0 0	0 0	-1 1	0 0	0 0	0 0	1 -1	0 0	0 0	0 0
Zulassungsaufwand neuer Produkte bleibt hoch + kein Einfluss auf Innovation	0 1 0	0 0 0	0 0	0 0	0 0	1 -1	0 0	0 0	0 0	-1 1	0 0	0 0	0 0
J. Wertschöpfungsstrategie													
Ressourcenschonende Kooperationen entlang von Wertschöpfungsketten	0 1 -1	0 0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	-1 1	2 -2	0 0		1 0	1 -1	1 -1
Abschottung von Elementen der Wertschöpfungsketten	1 -1 -2	0 0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	1 -1	-2 2	0 0		-1 0	-1 1	-1 1
K. Personalstrategie													
Hochmotivierte Mitarbeiter in Betrieben und ausreichendes Bildungsangebot	0 1 -1	0 0 0	-2 2	0 0	0 0	0 0	0 0	1 -1	0 0	1 -1		1 -1	1 -1
Eklatanter Fachkräftemangel und schlechte Arbeits- und Weiterentwicklungsbedingungen	1 -1 -2	0 0 0	2 -2	0 0	0 0	0 0	0 0	-1 1	0 0	-1 1		-1 1	-1 1
L. Gesellschaftspolitische Positionierung													
Vorausschauende Umsetzung von Regulierungen und gesellschaftlichen Ansprüchen	0 1 -1	0 0 0	-1 1	0 0	0 0	-1 1	-1 1	2 -2	1 -1	1 -1	1 -1	0 0	0 0
Reagieren statt agieren auf gesellschaftliche Ansprüche	1 -1 -1	0 0 0	1 -1	0 0	0 0	1 -1	1 -1	-2 2	-1 1	-1 1	1 -1	0 0	0 0
M. Digitalisierung der Produktion													
Maximale Transparenz und resultierende Ressourcenschonung	0 -1 1	0 0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	-1 1	1 -1	1 -1	1 -1	0 0	1 -1	0 0
Kleinmengenproduktion (ineffizient) und Verfehlung Transparenzziele	1 -1 -2	0 0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	1 -1	-1 1	-1 1	-1 1	0 0	-1 1	-1 1

Abbildung 48: Konsistente Szenarien mit Treiberausprägungen ohne Widersprüche, erstellt mithilfe der Software ScenarioWizard (Uni Stuttgart)

Szenario Nr. 1	Szenario Nr. 2	Szenario Nr. 3	Szenario Nr. 4	Szenario Nr. 5
A. Staatliche Förderung und Anreizsetzung: Maßgeschneidert	A. Staatliche Förderung und Anreizsetzung: Bleibt gleich			A. Staatliche Förderung und Anreizsetzung: Maßgeschneidert
B. Globale Nachfrage und Konsum: Nachfrage schwankt	B. Globale Nachfrage und Konsum: Nachfrage steigt			B. Globale Nachfrage und Konsum: Nachfrage schwankt
C. Bevölkerungsentwicklung und Fachkräftemangel: Fachkräftemangel und Überalterung harmonisiert	C. Bevölkerungsentwicklung und Fachkräftemangel: Überalterung reduziert			C. Bevölkerungsentwicklung und Fachkräftemangel: Fachkräftemangel und Überalterung konstant
D. Energie- und Rohstoffpreise: Rohstoffpreise zyklisch und global harmonisiert	D. Energie- und Rohstoffpreise: Stark steigend aber global unterschiedlich			D. Energie- und Rohstoffpreise: Rohstoffpreise zyklisch und global harmonisiert
E. Globale Rohstoff- und Metallmärkte: Abnehmende Verfügbarkeit + Handel frei + Nachfrage sinkt	E. Globale Rohstoff- und Metallmärkte: Hohe Verfügbarkeit + Handel gehemmt + Nachfrage steigt			E. Globale Rohstoff- und Metallmärkte: Abnehmende Verfügbarkeit + Handel frei + Nachfrage sinkt
F. Umwelt- Energie- und Ressourcenaufgaben harmonisiert + Zusatzkosten harmonisiert + Stoffverbote risikobasiert	F. Umwelt- Energie- und Ressourcenschutzgesetzgebung: Zusatzkosten harmonisiert + Stoffverbote risikobasiert			F. Umwelt- Energie- und Ressourcenschutzgesetzgebung: Hohe Emissionsauflagen mit Verzerrung + Hohe Zusatzkosten + Zunehmende Stoffverbote
G. Innovationsklima: Flächendeckende Innovationsförderung für Effizienz	G. Innovationsklima: Innovationsförderung für Effizienz verliert an Bedeutung			G. Innovationsklima: Flächendeckende Innovationsförderung für Effizienz
H. Nachhaltigkeitsstrategie: Nachhaltigkeitsstrategie flächendeckend verankert	H. Nachhaltigkeitsstrategie: flächendeckend verankert			H. Nachhaltigkeitsstrategie: Nachhaltigkeitsgedanke verliert an Bedeutung
I. Bürokratie: Zulassungsaufwand neuer Produkte sinkt + positiver Einfluss auf Innovation	I. Bürokratie: Zulassungsaufwand neuer Produkte sinkt + positiver Einfluss auf Innovation			I. Bürokratie: Zulassungsaufwand neuer Produkte bleib hoch + kein Einfluss auf Innovation
J. Wertschöpfungsstrategie: Ressourcenschonende Kooperationen entlang von Wertschöpfungsketten	J. Wertschöpfungsstrategie: Kooperationen entlang von Wertschöpfungsketten			J. Wertschöpfungsstrategie: Abschottung von Elementen der Wertschöpfungsketten
K. Personalstrategie: Hochmotivierte Mitarbeiter in Betrieben und ausreichendes Bildungsangebot	K. Personalstrategie: Hochmotivierte Mitarbeiter in Betrieben und ausreichendes Bildungsangebot			K. Personalstrategie: Eklatanter Fachkräftemangel und schlechte Arbeits- und Weiterentwicklungsbedingungen
L. Gesellschaftspolitische Positionierung: Vorausschauende Umsetzung von Regulierungen und gesellschaftlichen Ansprüchen	L. Gesellschaftspolitische Positionierung: Regulierungen und gesellschaftlichen Ansprüchen			L. Gesellschaftspolitische Positionierung: Reagieren statt agieren auf gesellschaftliche Ansprüche
M. Maximale Transparenz und resultierende Ressourcenschonung	M. Digitalisierung der Produktion: Maximale Transparenz und resultierende Ressourcenschonung			M. Digitalisierung der Produktion: Kleinstmengenproduktion (ineffizient) und Verfehlung Transparenzziele

Für die weitere Arbeit ist es zweckmäßig, nur mit wenigen ausgewählten Szenarien weiterzuarbeiten, die sich möglichst deutlich voneinander unterscheiden und in gewissem Maße günstige bzw. ungünstige Bedingungen darstellen. Betrachtet man die fünf konsistenten Szenarien aus Abbildung 48, so sind insbesondere Szenario 1 und 5 in vielen Treiberausprägungen unterschiedlich und erfüllen so hinreichend die Bedingung, dass sie unterschiedlich günstige Ausgangsbedingungen für Maßnahmen der Ressourcenschonung darstellen. Im Folgenden werden daher diese beiden Szenarien weiterverwendet, um die Maßnahmen unter günstigen und ungünstigen Bedingungen zu diskutieren. Im Folgenden werden diese beiden Szenarien unter den sie insgesamt kennzeichnenden Überschriften „Rückenwind“ und „Gegenwind“ beschrieben.

6.7.1 Szenario „Rückenwind“

In diesem Szenario überwiegen positive Rahmenbedingungen zur Umsetzung von Ressourcenschonungsmaßnahmen. Auf der globalen Ebene herrscht eine schwankende Nachfrage nach NE-Metallen mit einer im Durchschnitt sinkenden Tendenz. Die globale Verfügbarkeit von Metallen und Metallrohstoffen nimmt zwar ebenfalls tendenziell ab, der Handel ist aber frei von staatlichen Einschränkungen, so dass sich die Preise global gleichmäßig entwickeln können. Das gilt ebenfalls für die Energiepreise, die zwar ebenso schwanken wie die allgemeine Nachfrage, sich aber harmonisiert entwickeln. Der Fachkräftemangel und die Überalterung der Belegschaft in Deutschland konnten reduziert werden.

Die staatliche Förderung und Regulierung zeigt sich in diesem Szenario förderlich für Unternehmen und Produktinnovationen. So sind die staatlichen Förder- und Anreizprogramme maßgeschneidert auf spezifische Anforderungen der Branche und auf europäischer Ebene sind die Emissionsauflagen harmonisiert. Dadurch ergeben sich für Mitbewerber auf dem europäischen Markt identische Ausgangsbedingungen. Für die Stoffverbote in Produkten und Sekundärmaterialien gelten risikobasierte Grenzwerte auf der Basis von toxikologischen Untersuchungen.

Die allgemeine strategische Ausrichtung der Unternehmen und die Motivationslage bei den Mitarbeitern spiegeln die günstigen Bedingungen für eine ressourcenschonende Metallproduktion wieder. Bei den Unternehmen der NE-Branche sind Nachhaltigkeitsstrategien flächendeckend verankert und Kooperationen für Ressourcenschonung entlang von Wertschöpfungsketten sind weit verbreitet. Die Unternehmen sind darauf bedacht, gesellschaftliche Anforderungen früh zu erkennen und proaktiv umzusetzen, womit teilweise der Regulierungsbedarf reduziert werden kann. Die Mitarbeiter sind in Bezug auf Nachhaltigkeitsthemen und Ressourceneffizienz hoch motiviert und profitieren von weitreichenden Weiterbildungsangeboten. Die Digitalisierung der Produktion wird dazu genutzt, größtmögliche Transparenz über stoffliche und energetische Effizienz herzustellen und somit die darin liegenden Potenziale für Ressourcenschonung effektiv zu nutzen.

6.7.2 Szenario „Gegenwind“

In diesem Szenario überwiegen die ungünstigen Rahmendbedingungen für Ressourcenschonung. Zunächst einmal ähnlich gelagert wie im ersten Szenario sind die Rahmenbedingungen auf der globalen Ebene. Hier herrscht eine schwankende Nachfrage nach NE-Metallen mit einer im Durchschnitt sinkenden Tendenz. Die globale Verfügbarkeit von Metallen und Metallrohstoffen nimmt zwar ebenfalls tendenziell ab, der Handel ist aber frei von staatlichen Einschränkungen, so dass sich die Preise global gleichmäßig entwickeln können. Das gilt ebenfalls für die Energiepreise, die zwar ebenso schwanken wie die allgemeine Nachfrage, sich aber harmonisiert entwickeln. Ungünstig auf Ressourcenschonungspotenziale wirkt sich der unveränderte Fachkräftemangel und der Anstieg des durchschnittlichen Alters der Beschäftigten aus.

In Bezug auf die Zulassung neuer und innovativer Produkte ergeben sich potenziell hemmende Einflüsse aus dem zunehmenden Stoffverboten und den hohen und europaweit ungleichen Emissionsauflagen. Die staatliche Förderung in Deutschland bleibt dabei maßgeschneidert auf spezifische Bedarfe der NE-Metallindustrie und ist flächendeckend zur Förderung von Innovation verfügbar.

Auf der Seite der Unternehmen im NE-Metallbereich herrscht eine abwartende und wenig auf Nachhaltigkeit orientierte Einstellung vor. Nachhaltigkeit verliert dabei an Bedeutung, Unternehmen reagieren eher auf gesellschaftliche Anforderungen anstatt sie zu antizipieren und Elemente der Wertschöpfungsketten grenzen sich eher voneinander ab anstatt gemeinsam nach Lösungen für mehr Ressourcenschonung zu suchen. Auch in Bezug auf den Fachkräftemangel finden die Unternehmen keine Antworten, die Arbeitsbedingungen werden zunehmend unattraktiv und eine Weiterbildung der eigenen Mitarbeiter, insbesondere in Richtung Ressourcenschonung, bleibt aus. Auch die Digitalisierung bleibt in Bezug auf Ressourcenschonung und Transparenz hinter den Erwartungen zurück. Sie führt stattdessen zu einer stofflich- und energetisch ineffizienten Kleinstmengenproduktion und verfehlt zudem die Ziele von Transparenz entlang der Wertschöpfungskette, ohne die eine Realisierung von Ressourcenschonungspotenzialen schwieriger wird.

Betrachtet man die Einschätzung der Experten bezüglich der Erwartbarkeit der verschiedenen Treiberausprägungen und weist diese jedem der beiden Szenarien zu, so scheint das Szenario „Rückenwind“ etwas wahrscheinlicher eingeschätzt zu werden: sechs der Treiberausprägungen dieses Szenarios werden jeweils als die wahrscheinlichere Variante eingeschätzt, während es beim Szenario „Gegenwind“ nur vier sind. Insgesamt aber überwiegen bei beiden Szenarien Treiberausprägungen, die als eher unwahrscheinlich eingeschätzt wurden.

6.8 Diskussion der Maßnahmen unter den ausgewählten Szenarien

Die Diskussion der 20 Maßnahmen aus dem Zukunftsworkshop in Bezug auf die ermittelten Rahmenszenarien vollzieht sich entlang von zwei Fragerichtungen:

- ▶ Welche Maßnahmen können helfen, die **Chancen** zu nutzen, die das jeweilige Szenario für die Ressourcenschonung bietet?
- ▶ Welche Maßnahme können helfen, die **Risiken** zu mindern, die das jeweilige Szenario für die Ressourcenschonung mit sich bringt?

Das Szenario „**Rückenwind**“ zeichnet sich durch überaus günstige Bedingungen für die Umsetzung von Ressourcenschonungsmaßnahmen aus. Die globalen und nationalen Rahmenbedingungen (Globale Nachfrage und Konsum, Bevölkerungsentwicklung und Fachkräftemangel, Energie- und Rohstoffpreise, Globale Rohstoff- und Metallmärkte) weisen fast durchweg positive Ausprägungen für die Ressourcenschonungsmaßnahmen auf. Mehr oder weniger neutral verhält sich lediglich die Ausprägung „Nachfrage schwankt“ beim Rahmentreiber Globale Nachfrage und Konsum. Die Schwankung kann aber immerhin dazu führen, dass sich Unternehmen im Rahmen einer Nachhaltigkeitsstrategie auf besondere Nachfrage nach ressourcenschonend hergestellten Produkten fokussieren, um sich wichtige Marktsegmente zu sichern. Ansonsten aber gefährdet diese Nachfrageschwankung ganz allgemein solche Innovationen und Maßnahmen, die von einer längeren Amortisationszeit geprägt sind. Die Maßnahme „Akzeptanz längerer Amortisationszeiten“ kann diesem Risiko vorbeugen, wenn sie in der Unternehmensstrategie und bei den Investoren und Aktionären etabliert werden kann. Im Bereich der Regulierung und Anreizsysteme (Staatliche Förderung und Anreize, Umwelt-, Ressourcen- und Umweltschutzgesetzgebung, Innovationsklima, Bürokratie) liegen ausschließlich günstige Rahmenbedingungen vor, so dass die Ressourcenschonungsmaßnahmen hier auf eine große Menge an Chancen für effektive Umsetzung stoßen. Das gilt ebenso für den Bereich Unternehmensstrategien (Nachhaltigkeitsstrategie, Wertschöpfungsstrategie, Personalstrategie, Gesellschaftspolitische Positionierung, Digitalisierung der Produktion) in dem alle Rahmenbedingungen positiv gesetzt sind.

Das Szenario „**Gegenwind**“ zeichnet sich durch eine durchwachsene Lage bei den Rahmenbedingungen aus. Im Bereich der globalen und nationalen Rahmenbedingungen (Globale Nachfrage und Konsum, Bevölkerungsentwicklung und Fachkräftemangel, Energie- und Rohstoffpreise, Globale Rohstoff- und Metallmärkte) unterscheidet sich dieses Szenario vom vorhergehenden in Bezug auf den Treiber

„Bevölkerungsentwicklung und Fachkräftemangel“ (hier: Fachkräftemangel und Überalterung konstant). Diese Treiberausprägung stellt ein Risiko für die Umsetzung von Maßnahmen für Ressourcenschonung dar, da in Bezug auf Effizienz gut ausgebildete Fachkräfte eine wichtige Grundbedingung sind. Von den priorisierten Maßnahmen ist allerdings keine geeignet dieses Risiko zu minimieren.

Im Bereich Regulierung und Anreizsysteme (Globale Nachfrage und Konsum, Bevölkerungsentwicklung und Fachkräftemangel, Energie- und Rohstoffpreise, Globale Rohstoff- und Metallmärkte) sind vor allem die Ausprägungen „Hohe Emissionsauflagen mit Verzerrung + Hohe Zusatzkosten + Zunehmende Stoffverbote“, und „Zulassungsaufwand neuer Produkte bleibt hoch + kein Einfluss auf Innovation“. Diese stellen deutliche Risiken für die Umsetzung von Ressourcenschonung dar, welche durch Maßnahmen reduziert werden können, die emissionsmindernd wirken, die eine bessere stoffliche Trennung stärken, insbesondere die Schadstoffentfrachtung betreffend, und die allgemein die Rezyklierbarkeit von Produkten verbessern. Dies sind die Maßnahmen „Abgleich von widersprüchlichen Regelungen (Chemikalienrecht)“, „Optimierter Brenneinsatz“, „Sortierung gemischter Schrotte + Einsatz innovativer Sortiertechnik mit erhöhter Metallausbeute“, „Produktdesign - Fertigung für ein vereinfachtes Recycling“, „Mehr und bessere Kontrolle von Abfall Im- und Exporten“, „Verbesserte Aufbereitung von Schlacken aus der Primärgewinnung“, „F&E zur Schnittstellenoptimierung Aufbereitung – Metallurgie für komplexe Konzentrate“, die also in diesem Sinne risikoreduzierend wirken.

Im Bereich Unternehmensstrategien (Nachhaltigkeitsstrategie, Wertschöpfungsstrategie, Personalstrategie, Gesellschaftspolitische Positionierung, Digitalisierung der Produktion) unterscheidet sich dieses Szenario in allen Treiberausprägungen, womit mehrere Risiken verbunden sind. Als risikomindernde Maßnahmen sind alle Maßnahmen geeignet, die die Nachhaltigkeitsstrategie in Unternehmen unterstützen können, wie z.B. Industrial Symbiosis Verbände gründen oder die vermutlich sowieso einziehende Digitalisierung (Industrie 4.0) für Ressourceneffizienz nutzen. Die letztere Maßnahme würde auch das Risiko minimieren, dass die Digitalisierung ansonsten nur zur ineffizienten Kleinstmengenproduktion genutzt wird. Weitere Maßnahmen welche die Risiken in diesem Bereich mindern können sind naheliegend: einerseits alle Maßnahmen die der Verbesserung der wertschöpfungskettenübergreifenden Kooperation dienen (Sortierung gemischter Schrotte + Einsatz innovativer Sortiertechnik mit erhöhter Metallausbeute, Produktdesign-Fertigung für ein vereinfachtes Recycling, F&E zur Schnittstellenoptimierung Aufbereitung – Metallurgie für komplexe Konzentrate, Technologische Weiterentwicklung zur Verarbeitung komplexer werdender Sekundärmaterialien). Andererseits wären das Maßnahmen, die dem Risiko aus dem eher reaktiven Verhalten von Unternehmen entgegenwirken, wie der Abgleich von widersprüchlichen Regelungen (Chemikalienrecht), wodurch ein reaktives Verhalten zu eher weniger Verzögerungen bei der Umsetzung von Ressourcenschonungsmaßnahmen führen würde.

Zusammenfassend sind die Maßnahmen, die entweder die Risiken minimieren oder die Chancen nutzen helfen in Tabelle 54 abgebildet. Diese Zuordnung von Maßnahmen und Szenarien kann nun als robuste Grundlage für eine anschließende Entwicklung von Roadmaps für den NE-Metallsektor genutzt werden (Möhrle und Isenmann 2017; Sauer et al. 2016).

Tabelle 54: Zuordnung der Maßnahmen zu den Szenarien in Bezug auf die Nutzung der Chancen bzw. die Reduzierung der Risiken, die sich aus den Szenarien für die Umsetzung von Ressourcenschonung ergeben.

Dimension	Rückenwind	Gegenwind
Chancen nutzen	<ul style="list-style-type: none"> • Abgleich von widersprüchlichen Regelungen (Chemikalienrecht) • Verbesserung der Investitionsanreize für Energie- und Ressourceneffizienz • Verhindern, dass Energieeinsparungen die EEG-Befreiung gefährden • Einsatz dezentraler erneuerbarer Energie • Gebäudegestaltung zur Optimierung von Heizung und Lüftung • Industrial Symbiosis: Wärme-, Strom etc. Systemverbünde nutzen • Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien: Lastmanagement zur Nutzung von überschüssigem EE-Strom • Prozessinterne Wärmerückführung • Externe Abwärmenutzung • Industrie 4.0 für Effizienz einsetzen • Optimierter Brenneinsatz • Technologische Weiterentwicklung zur Verarbeitung komplexer werdender Sekundärmaterialien • F&E zur Schnittstellenoptimierung Aufbereitung – Metallurgie für komplexe Konzentrate • Sortierung gemischter Schrotte + Einsatz innovativer Sortiertechnik mit erhöhter Metallausbeute • Produktdesign-Fertigung für ein vereinfachtes Recycling • Mehr und bessere Kontrolle von Abfall Im- und Exporten • Verbesserte Aufbereitung von Schlacken aus der Primärgewinnung • Technologische Weiterentwicklung zur Verarbeitung komplexer werdender Konzentrate 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Investitionsanreize für Energie- und Ressourceneffizienz Maßnahmen • Akzeptanz längerer Amortisationszeiten • Verhindern, dass Energieeinsparungen die EEG-Befreiung gefährden • Einsatz dezentraler erneuerbarer Energie • Gebäudegestaltung zur Optimierung von Heizung und Lüftung • Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien: Lastmanagement zur Nutzung von überschüssigem EE-Strom • Prozessinterne Wärmerückführung • Externe Abwärmenutzung
Risiken minimieren	<ul style="list-style-type: none"> • Akzeptanz längerer Amortisationszeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie 4.0 für Effizienz einsetzen • Abgleich von widersprüchlichen Regelungen (Chemikalienrecht) • Industrial Symbiosis: Wärme-, Strom etc. Systemverbünde nutzen • Optimierter Brenneinsatz

- Sortierung gemischter Schrotte + Einsatz innovativer Sortier-technik mit erhöhter Metallausbeute
- Produktdesign-Fertigung für ein vereinfachtes Recycling
- Mehr und bessere Kontrolle von Abfall Im- und Exporten
- Verbesserte Aufbereitung von Schlacken aus der Primärgewinnung
- F&E zur Schnittstellenoptimierung Aufbereitung – Metallurgie für komplexe Konzentrate
- Technologische Weiterentwicklung zur Verarbeitung komplexer werdender Sekundärmaterialien

7 Zusammenfassende Bewertung und Ausblick

Zentrales Ziel des Vorhabens war es, eine Diskussion zur Rolle der NE-Metallindustrie in einer Green Economy zu initiieren und mögliche Bausteine einer entsprechenden Entwicklung und deren Hemmnisse herauszuarbeiten. Dies wurde durch eine Kombination der verschiedenen – und gleichsam mächtigen - Werkzeuge der Experteneinbindung (Delphi-Befragung, Zukunfts- und Szenarienworkshop) in großer Breite und Tiefe erreicht:

- ▶ Als Ergebnis der Arbeitspakete 1 bis 4 liegen strukturierte Bündel möglicher Ressourcenschonungsmaßnahmen für die Nichteisenmetallindustrie vor. Diese beinhalten die Ressourcenschonungsmaßnahmen, die von den beteiligten Experten in Delphi-Befragung und Zukunftsworkshop mit dem höchsten Potential bewertet wurden.
- ▶ Im Szenarienworkshop wurden ergänzend interne und externe Einflussfaktoren sowie Wild Cards erarbeitet und bewertet. Auf dieser Basis können konsistente Szenarien nach der Cross-Impact-Bilanz-Methode erstellt werden. Diese können dann nachfolgend (nicht mehr innerhalb dieses Projektes) als Gerüst dienen, um die in der ersten Phase des Projekts gesammelten Maßnahmenvorschläge in einen sinnvollen Kontext zu stellen. Diese Maßnahmen im Kontext von Szenarien sind damit zugleich die Vorarbeit für ein Innovations-Roadmapping (Sauer et al. 2016). Dabei ließen sich die identifizierten Top-Maßnahmen z.B. in einer konzertierten Aktion auf spezifische Akteure in Politik, Industrie und Wissenschaft „herunterzuberechnen“, z.B. wer stößt welche konkreten FuE-Projekte an, wer initiiert andere begleitende Aktivitäten, als anschauliche Darstellung möglicher Wege zur Umsetzung der Ressourcenschonung (Roadmaps).

Die angestoßene Diskussion zur Ressourcenschonung in der Nichteisenmetallindustrie beschränkt sich dabei nicht auf die unmittelbar im Projekt angesiedelten Wege der Experteneinbindung. So wurden auch auf der European Metallurgical Conference (EMC) 2017 in Leipzig in einer separaten Session die zentralen Projektergebnisse vorgestellt und von einschlägigen Experten kommentiert und diskutiert. Die hier angestoßene Diskussion zeigte zum einen breiten Konsequenz bezüglich der Wichtigkeit des durchgeführten Vorhabens. Zum anderen wurden durch verschiedene internationale Teilnehmer Einschätzungen aus der jeweiligen internationalen Perspektive beigeleitet. Neben den inhaltlichen Aspekten hat dies den Wert der Projektergebnisse als „Trigger“ für entsprechende Diskussionen zu dienen, deutlich gemacht. Zusammenfassend lassen sich folgende zentrale Punkte aus der Diskussion auf der EMC 2017 benennen:

- ▶ Längere Amortisationszeiten: Hier wurde zum einen die Schwierigkeit hervorgehoben, einen entsprechenden Kulturwechsel zu erreichen. Ein „supportive Framework“ (bspw. Steueranreize) wird als hilfreich angesehen. Gleichzeitig wird in der öffentlichen Beschaffung ein Ansatzpunkt gesehen, eine „pull-Wirkung“ zu erzeugen.
- ▶ Export-Politik: Die Bedeutung von „Level Playing Field“ wird hervorgehoben.
- ▶ Industrie 4.0: Ein „Hype with high hopes“. Gerade im Bereich der Abfallwirtschaft wird ein großes Potenzial gesehen, durch zunehmende Digitalisierung zusätzliche Ressourcenschonungspotenziale zu heben. Die Transparenz in der Abfallwirtschaft sei bislang „noch vom vorherigen Jahrhundert“.
- ▶ Bildung: Bildung in Bezug auf das Verstehen von Systemzusammenhängen wird als wichtig erachtet. Dies beinhaltet:
 1. Kenntnis über Materialflüsse
 2. Kenntnis über Materialqualitäten
 3. Kenntnis über Beeinflussung anderer Systemelemente durch das Umsetzen einzelner Maßnahmen ins besondere in Bezug auf die Erreichung der Ziele der Green Economy
 4. Wo macht es Sinn anzusetzen? („We can't squeeze the last drop out of a lemon...“)
 5. Wo gibt es noch unentdeckte „low hanging fruits“?

6. Wie sind Datenbanken zu organisieren, damit sie zur Vorhersage, zur zielgerechten Steuerung usw. genutzt werden können?
7. Bildung der Konsumenten zur Ressourcenschonung: Erzeugung eines Market-Pulls

Hervorzuheben ist darüber hinaus, das positive Feedback der beteiligten Experten zur Intensität der Experteneinbindung sowie das hohe Interesse zu einem weiterführenden Gedankenaustausch. Eine Verstetigung des Prozesses, die Projektergebnisse auf verschiedenen Wegen zum Diskussionsgegenstand in den verschiedenen Stakeholdergruppen (Industrie, Forschung, Behörden) zu machen, erscheint in höchstem Maße sinnvoll. Dies kann zum einen im Rahmen Workshops, Diskussionsveranstaltungen etc. geschehen. Zum anderen kann auch die Publikation von (Teil-) Ergebnissen über die Veröffentlichung des Projektberichtes hinaus eine wirkungsvolle Möglichkeit darstellen.

8 Quellenverzeichnis

- Abdelaziz, E.A.; Saidur, R.; Mekhilef, S. (2011): A review on energy saving strategies in industrial sector. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (1), S. 150–168.
- Achzet, B., Reller, A., Zepf, V., Rennie, C., Ashfield, M., & Simmons, J. (2011). *Materials critical to the energy industry: An introduction*. Augsburg.
- American Physical Society, & Materials Research Society (2011). *Energy Critical Elements: Securing Materials for Emerging Technologies*. A report by the APS panel on public affairs & the materials research society. Washington, USA.
- Angerer, G.; Moring, A.; Marscheider-Weidemann, F.; Wietschel, M. (2010): *Kupfer für Zukunftstechnologien. Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität*. Fraunhofer ISI. Karlsruhe.
- Aurubis AG (2012): *Kayser Recycling System*. Lünen. Online verfügbar unter <http://www.metalleproklima.de/bestpractice/elektroschrott-recycling/kayser%20recycling%20system>, zuletzt geprüft am 20.11.2013.
- Aurubis AG (2012a): *Umweltreport 2012*. Hamburg.
- Ayres, R. U.; Ayres, L. W.; Råde, I. (2002): *The life cycle of copper, its co-products and by-products*. Unter Mitarbeit von Roland Geyer, Julia Hansson, Donald Rogich, Johan Rootzén und Benjamin Warr. Hg. v. International Institute for Environment and Development (IIED) und World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). INSEAD, Center for the Management of Environmental Resources. Fontainebleau Cedex, Frankreich.
- Ball, R.; Tunger, D. (2005): *Bibliometrische Analysen - Daten, Fakten und Methoden*. Grundwissen Bibliometrie für Wissenschaftler, Wissenschaftsmanager, Forschungseinrichtungen und Hochschulen. Jülich: Forschungszentrum, Zentralbibliothek (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Bibliothek, 12).
- Bartusch, H.; Fernández A.; Fröhling, M.; Schultmann, F.; Schwaderer, F. (2013): *Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz und Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Eisen-, Stahl- und Zinkindustrie (ERESTRE)*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- BGR (2012): *Deutschland Rohstoffsituation 2011. DERA Rohstoffinformationen 13*. Unter Mitarbeit von Hans-Georg Babies, Peter Buchholz, Doris Homberg-Heumann, Dieter Huy, Jolanta Kus, Jürgen Meßner et al. Hannover.
- BMU (2012): *Green Economy. Neuer Schwung für Nachhaltigkeit*. Hg. v. Naturschutz und Reaktorsicherheit Bundesministerium für Umwelt. Berlin.
- BMU; BDI (2012): *Memorandum für eine Green Economy. Eine gemeinsame Initiative des BDI und BMU*. Hg. v. Naturschutz und Reaktorsicherheit Bundesministerium für Umwelt und Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. Berlin.
- Braun, H., Dobler, H.-D., Doll, W., Fischer, U., Günter, W., Heinzler, M., Höll, H., Ignatowitz, E., Röhrer, T., Röhrer, W., Schilling, K., & Strecker, D. (1999). *Fachkunde Metall*. (53., überarb. Aufl., 1. Dr.). Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer.
- Bräutigam, K.-R.; Achternbosch, M.; Hartlieb, N.; Kupsch, C.; Sardemann, G. (2008): *Ressourcen- und Abfallmanagement von Cadmium in Deutschland*. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe.
- Brunori, C.; Cremisini, C.; Massaniso, P.; Pinto, V.; Torricelli, L. (2005): *Reuse of a treated red mud bauxite waste: studies on environmental compatibility*. In: *Journal of Hazardous Materials* 117 (1), S. 55–63.
- Bunse, K.; Vodicka, M.; Schönsleben, P.; Brühlhart, M.; Ernst, F. O. (2011): *Integrating energy efficiency performance in production management—gap analysis between industrial needs and scientific literature*. In: *Journal of Cleaner Production* 19 (6), S. 667–679.
- Chertow, M. R. (2000): *Industrial Symbiosis, Literature and Taxonomy*. In: *Annual Review of Energy and the Environment* 25, S. 313–337.
- Choate, W. T.; Green, J. A. S. (2007): *US energy requirements for aluminum production: historical perspective, theoretical limits and current practices: US Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy*.
- Classen, M.; Althaus, H.-J.; Blaser, S.; Tuchschild, M.; Jungbluth, N.; Doka, G. et al. (2009): *Life Cycle Inventories of Metals*. Final report ecoinvent data v2.1, No. 10. EMPA; Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, Schweiz.
- Cocquerel, M. A.; Cuadra, C.; Moya, T. (1999): *Process gas handling in copper metallurgy*. In: G. A. Eltringham, B. A. Hancock, J. E. Dutrizac, S. K. Young, David B. George und C. Díaz (Hg.): *Proceedings of COPPER 99 - COBRE 99*: Tms.
- Cuhls, K. (2008): *Methoden der Technikvorausschau – eine internationale Übersicht*. Karlsruhe: IRB.

- Das, S. (2012): Achieving carbon neutrality in the global aluminum industry. In: JOM 64 (2), S. 285–290.
- DERA (2012): Kupfer. Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe. Hg. v. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover.
- DERA (2013): DERA Rohstoffinformationen 16. Rohstoffrisikobewertung - Kupfer. Kurzbericht. Unter Mitarbeit von Ulrike Dorner, Peter Buchholz, Maren Liedtke und Michael Schmidt. Hg. v. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin.
- Deutsches Kupferinstitut (1997): Kupfervorkommen, Gewinnung, Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung. DKI Informationsdruck. Düsseldorf.
- Deutsches Kupferinstitut (2012): Blick über den Horizont. Ganzheitliche Umweltprofile von Kupferprodukten. Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V. Düsseldorf.
- Deutsches Kupferinstitut (o.J.): Deutsches Kupferinstitut - Kupfer und seine Anwendungen - Fachinformationen, Beratung, Verlag DKI. Online verfügbar unter http://www.kupferinstitut.de/front_frame/frameset.php3?client=1&lang=1&idcat=37&parent=14, zuletzt geprüft am 28.10.2013.
- Dufloy, J. R.; Sutherland, J. W.; Dornfeld, D.; Herrmann, C.; Jeswiet, J.; Kara, S. et al. (2012): Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2), S. 587–609.
- Dürr, H.; Bauernhansl, T. (2013): Energieeffizienz muss auf die politische Agenda: Energiewende erfordert Effizienzmaßnahmen. In: *Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung/Quarterly Journal of Economic Research* 82 (3), S. 183–198.
- EAA (2013): Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry. Life Cycle Inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe - Data for the year 2010. Hg. v. European Aluminium Association.
- Emsley, J. (2011): Nature's building blocks. An A-Z guide to the elements. New ed., completely rev. and updated. Oxford, New York: Oxford University Press.
- Erdmann, L.; Behrendt, S. (2011): Kritische Rohstoffe für Deutschland. Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte. Final report. Hg. v. kfw Bankengruppe. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. Berlin.
- Erdmann, L.; Graedel, T. E. (2011): Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses. In: *Environ. Sci. Technol* 45 (18), S. 7620–7630.
- Espinosa, D. C. R.; Bernardes, A. M.; Tenório, J. A. S. (2004): An overview on the current processes for the recycling of batteries. In: *Journal of Power Sources* 135 (1-2), S. 311–319.
- European Commission (2010): Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Hg. v. Europäische Kommission. Europäische Kommission. Brüssel.
- European Commission (2011). Materials Roadmap Enabling Low Carbon Energy Technologies. Commission Staff Working Paper.
- European Copper Institute (2013): About Copper. Online verfügbar unter <http://www.copperalliance.eu/about-copper/processes>, zuletzt geprüft am 29.10.2013.
- Fayram, T. S.; Anderson, C. G. (2008): The development and implementation of industrial hydrometallurgical gallium and germanium recovery. In: *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 25 (108), S. 261–271.
- Flesch, T. (2013): Aluminiumelektrolyse als Stromspeicher - ein Beitrag zum Gelingen der Energiewende. If.E-Innovationsworkshop 2013. TRIMET Aluminium SE. Berlin, 2013.
- Fortini, O. (2011): Hall cell energy recovery and anode pre-heating, gauging the opportunity. In: JOM 63 (8), S. 127–131.
- Fthenakis, V.; Wang, W.; Kim, H. (2009): Life cycle inventory analysis of the production of metals used in photovoltaics. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (3), S. 493–517.
- Gavlas, S.; Lenhard, R.; Jandačka, J.; Dančová, P.; Novotný, P. (2013): Design and numerical simulation of the heat exchanger for heat recovery system with melting furnaces for melting secondary aluminums. In: *EPJ Web of Conferences* 45, S. 1033.

- Geschka, H.; Schauffele, J.; Zimmer, C. (2017): Explorative Technologie-Roadmaps. Eine Methodik zur Erkundung technologischer Entwicklungslinien und Potenziale. In: Martin G. Möhrle und Ralf Isenmann (Hg.): Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. 3. Aufl. Berlin: Springer; Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- GDA (2013a): Erzeugung von Aluminium - Werkstoff für die Ewigkeit. Hg. v. Gesamtverband der Aluminiumindustrie (GDA). Online verfügbar unter <http://www.aluinfo.de/index.php/erzeugung-von-aluminium.html>, zuletzt geprüft am 08.11.2013.
- Giegrich, J.; Liebich, A.; Fehrenbach, H. (2007): Ableitung von Kriterien zur Beurteilung einer hochwertigen Verwertung gefährlicher Abfälle. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 20235310. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung. Heidelberg.
- Glänzel, W. (2012): Bibliometric methods for detecting and analysing emerging research topics. In: *El Profesional de la Informacion* 21 (2), S. 194–201.
- Gordon, R.B.; Graedel, T.E.; Bertram, M.; Fuse, K.; Lifset, R.; Rechberger, H.; Spatari, S. (2003): The characterization of technological zinc cycles. In: *Resources, Conservation and Recycling* 39 (2), S. 107–135.
- Gößling-Reisemann, S.; Gleich, A. v.; Ruth, M.; Fischer, R.; Stockmar, D. (2007): Kupferzyklen Deutschland. Eine Studie zu Lebenszyklusdaten für Kupferprodukte in Deutschland, mit Fokus auf Datenqualität, Allokationsverfahren und Recyclingflüsse. Hg. v. Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse. Bremen; Karlsruhe.
- Goupil, G.; Bonnefont, G.; Idrissi, H.; Guay, D.; Roué, L. (2013): Consolidation of mechanically alloyed Cu–Ni–Fe material by spark plasma sintering and evaluation as inert anode for aluminum electrolysis. In: *Journal of Alloys and Compounds* 580, S. 256–261.
- Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. K. et al. (2011): What Do We Know About Metal Recycling Rates? In: *Journal of Industrial Ecology* 15 (3), S. 355–366.
- GRS (2012): Die Welt der Batterien. Funktion, Systeme, Entsorgung. Hg. v. Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS). Hamburg.
- Häder, M. (2009): Delphi-Befragungen. Ein Arbeitsbuch. 2. Aufl. Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss. (Lehrbuch).
- Hadi Fanisalek, M.; Kamaliz, R. (2012): Aluminum smelter waste heat recovery plant (heat exchangers fouling and corrosion- a detailed investigation). In: *Energy Technology 2012: Carbon Dioxide Management and Other Technologies*, S. 203.
- Hagelüken, C.; Buchert, M.; Stahl, H. (2005): Stoffströme der Platingruppenmetalle. Systemanalyse und Massnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle ; Endbericht. Clausthal-Zellerfeld: GDMB-Medienverl.
- Hagelüken, C. (2007): Recycling von Autokatalysatoren – Strukturelle Defizite trotz ausgereifter Technik. Umicore Precious Metals Refining. Hanau.
- Hagelüken, C. (2010): Beitrag des Recyclings zur Versorgungssicherheit bei Technologiemetallen. In: Karl Thomé-Kozmiensky und Daniel Goldmann (Hg.): *Recycling und Rohstoffe*. Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky.
- Hatch (2014): Light Metals articles. Hg. v. Hatch Ltd. Online verfügbar unter http://www.hatch.ca/Mining_Metals/Light_Metals/Articles/default.htm, zuletzt aktualisiert am 17.04.2014, zuletzt geprüft am 29.04.2014.
- Heger Ferrit (o.J.): Heger Ferrit - Spezialgießerei für handgeformten Eisenguss in Serie. Sembach. Online verfügbar unter <http://www.hegerferrit.com/unternehmen/>, zuletzt geprüft am 30.04.2014.
- Helle, S.; Pedron, M.; Assouli, B.; Davis, B.; Guay, D.; Roué, L. (2010a): Structure and high-temperature oxidation behaviour of Cu–Ni–Fe alloys prepared by high-energy ball milling for application as inert anodes in aluminium electrolysis. In: *Corrosion Science* 52 (10), S. 3348–3355.
- Helle, S.; Davis, B.; Guay, D.; Roué, L. (2010b): Electrolytic Production of Aluminum Using Mechanically Alloyed Cu–Al–Ni–Fe-Based Materials as Inert Anodes. In: *J. Electrochem. Soc.* 157 (11), S. E173.
- Helle, S.; Brodu, B.; Davis, B.; Guay, D.; Roué, L. (2011): Influence of the iron content in Cu–Ni based inert anodes on their corrosion resistance for aluminium electrolysis. In: *Corrosion Science* 53 (10), S. 3248–3253.
- Hoock, R. (2008): Kupfer im Automobilbau -Anwendungen und Randbedingungen. In: *Metall* 62 (10), S. 613.
- Hydro (2011): Recycling von Aluminium. Online verfügbar unter <http://www.hydro.com/de/Subsites/Nenzing/Aluminium/Recycling-Aluminium/>, zuletzt aktualisiert am 22.11.2011, zuletzt geprüft am 20.11.2013.

- Hydro (2013): Recycling von Aluverpackungen auf gutem Weg - Hydro in Deutschland. Online verfügbar unter <http://www.hydro.com/de/Deutschland/Presse/Nachrichten-Hydro-Aluminium-aktuell-Metall/2013/Recycling-von-Aluverpackungen-auf-gutem-Weg/>, zuletzt aktualisiert am 15.02.2013, zuletzt geprüft am 20.11.2013.
- Hydro (o.J.): Unsere Prozesskette. Firmenschrift. Unter Mitarbeit von Michael-Peter Steffen. o.O.
- Initiative Zink (2011): Das Informationsportal der Initiative Zink. Online verfügbar unter <http://www.initiative-zink.de/basiswissen/das-metall-zink.html>, zuletzt aktualisiert am 30.08.2011, zuletzt geprüft am 01.11.2013.
- Ismann, Ralf (2013): Zum Verständnis einer Green Economy. Neuer Leitbegriff auf dem Weg zu einem nachhaltigen Wirtschaften? In: *Ökologisches Wirtschaften* 29 (3), S. 17–19.
- Jarvi, J.; Vaarno, J.; Nyberg, J.; Siirila, H. (2002): Improvements of Zinc Roaster Waste Heat Boiler. In: Sulfide smelting 2002: proceedings of a symposium sponsored by the Extraction and Processing Division (EPD) of TMS (the Minerals, Metals & Materials Society): held during the 2002 TMS Annual Meeting in Seattle, Washington, February 17-21, 2002: Tms, S. 421.
- JRC (2013): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metal Industries. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. Draft 3 (February 2013). European Commission; Joint Research Center (JRC) Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit.
- Kawohl, C. (2011): Praxisdialog "Ressourcen- und materialeffiziente Produktgestaltung" 2. November 2001, Berlin. Multi-Metall Recycling bei der Aurubis AG. Industrie Service, Aurubis AG. Berlin. Online verfügbar unter http://www.bgr.bund.de/DERA/.../Praxisdialog_02112011_Kawohl.pdf, zuletzt aktualisiert am 04.11.2011, zuletzt geprüft am 20.11.2013.
- Ladam, Y.; Solheim, A.; Segatz, M.; Lorentsen, O. (2011): Heat Recovery from Aluminium reduction Cells. In: *Light Metals 2011*, S. 393–398.
- Langner, B. E. (2013): Trends in Copper Production: From Ore to Cathode. In: *World of Metallurgy -ERZMETALL* 66 (2).
- Lauwigi, C.; Dressler, C. (2011): IX. Zink. In: Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Teil 2: Untersuchungen zu ausgewählten Metallen: Gallium, Gold, Indium, Mangan, Nickel, Palladium, Silber, Titan, Zink, Zinn. Meilensteinbericht des Arbeitsschritts 2.1 des Projekts MaRes. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie. Wuppertal.
- Lehner, T.; Wiklund, J. (2000): Sustainable production: The business of non-ferrous smelting in Sweden. In: Douglas Raymond Swinbourne (Hg.): *Minprex 2000. International Congress on Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 11-13 September 2000, Melbourne Victoria. Carlton, Vic: Australasian Institute of Mining and Metallurgy (Publication series 5/2000).
- Lemken, T.; Lucas, R.; Acosta, J.; Bleischwitz, R.; Kaiser, C.; Krause, M. et al. (2008): Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung. Teilvorhaben 1: Potenzialermittlung, Maßnahmenvorschläge und Dialog zur Ressourcenschonung. Publikationen des Umweltbundesamtes. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH; Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung.
- Leroy, C. (2009): Provision of LCI data in the European aluminium industry Methods and examples. In: *Int J Life Cycle Assess* 14 (S1), S. 10–44.
- Li, W.; Zhang, G.; Li, J.; Lai, Y. (2009): NiFe₂O₄-based cermet inert anodes for aluminum electrolysis. In: *JOM* 61 (5), S. 39–43.
- Liu, G.; Müller, D. B. (2012): Addressing sustainability in the aluminum industry: a critical review of life cycle assessments. In: *Journal of Cleaner Production* 35, S. 108–117.
- Liu, W.; Yang, J.; Xiao, .o (2009): Application of Bayer red mud for iron recovery and building material production from aluminosilicate residues. In: *Journal of Hazardous Materials* 161 (1), S. 474–478.
- Lucas, R.; Röhr, A.; Scharp, M.: Das Rohstoffsystem Kupfer - Status Quo, Perspektiven und Handlungsbedarf aus Sicht einer nachhaltigen Ressourcenpolitik. UFOPLAN Vorhaben FKZ 206 93 100/01. Unter Mitarbeit von Raimund Bleischwitz. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH; Umweltbundesamt.
- Lucio, N. R.; Lamas, W.; Camargo, J. (2013): Strategic energy management in the primary aluminium industry: Self-generation as a competitive factor. In: *Energy Policy* 59, S. 182–188.
- Ma, X.X; He, Y.D; Wang, D.R (2011): Inert anode composed of Ni-Cr alloy substrate, intermediate oxide film and α -Al₂O₃/Au (Au-Pt, Au-Pd, Au-Rh) surface composite coating for aluminium electrolysis. In: *Corrosion Science* 53 (3), S. 1009–1017.

- Maruoka, N.; Akiyama, T. (2006): Exergy recovery from steelmaking off-gas by latent heat storage for methanol production. In: *Energy* 31 (10-11), S. 1632–1642.
- Meier, F. (2006): Sonderheft zum 140 jährigen Bestehen der Norddeutschen Affinerie AG. Hg. v. Norddeutsche Affinerie AG. Hamburg.
- Menzie, W. David; Soto-Viruet, Y.; Bermúdez-Lugo, O.; Mobbs, P. M.; Perez, A.; Taib, M.; Wacaster, S. (2013): Review of Selected Global Mineral Industries in 2011 and an Outlook to 2017. Open-File Report 2013-1091. Hg. v. USGS - U.S. Geological Survey und U.S. Department of the Interior.
- Messner, T.; Antrekowitsch, H.; Pesl, J.; Hofer, M. (2005): Prozessoptimierung durch Stoffstromanalyse am Schachtofen der Montanwerke Brixlegg AG. In: *Berg Huettenmaenn Monatsh* 150 (7), S. 251–257.
- Metalle pro Klima (o.J.): Berzelius: umweltfreundliches Batterie-Recycling. Hg. v. Metalle pro Klima. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.metalleproklima.de/presse/tagesmeldung/berzelius-umweltfreundliches-batterie-recycling>, zuletzt aktualisiert am 15.04.2014, zuletzt geprüft am 15.04.2014.
- Metalle pro Klima (2012): Kayser Recycling System (KRS). Online verfügbar unter <http://www.metalleproklima.de/bestpractice/elektronikschrott-recycling>, zuletzt geprüft am 20.11.2013.
- Metalle pro Klima (2013): Hocheffiziente Bleiherstellung dank QSL-Verfahren. Berzelius Metall GmbH. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.metalleproklima.de/bestpractice/hocheffiziente-bleiherstellung-dank-qs-verfahren>, zuletzt geprüft am 05.12.2013.
- Metalle pro Klima (2014): Best Practice. Online verfügbar unter <http://www.metalleproklima.de/bestpractice/>, zuletzt geprüft am 15.01.2014.
- Migchielsen, Ir (2005): Potentials for Increasing Fuel Efficiency For Aluminium Melting Furnaces". In: *Light Metals* 2005, S. 893–898.
- Möhrle, M. G.; Isenmann, R. (Hg.) (2017): Technologie-Roadmapping. Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen // Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. 4. Aufl. Berlin: Springer; Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- Moss, R. L., Tzimas, E., Kara, H., & Kooroshy, J. (2011). Critical Metals in Strategic Energy Technologies: Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. JRC Scientific and technical reports.
- MRU (o.J.): Sekundärbleihütte mit integrierter Sonderabfallverbrennungsanlage. Hg. v. Muldenhütten Recycling und Umwelttechnik GmbH. Freiberg. Online verfügbar unter http://www.berzelius.de/berzelius/dokumente/MRU_BLEI_D.pdf, zuletzt aktualisiert am 06.12.2006, zuletzt geprüft am 15.04.2014.
- Mudd, G. M. (2007): The sustainability of mining in Australia: key production trends and their environmental implications. Research Report. Department of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute. Melbourne, Australia.
- Mudd, G. M. (2010): The Environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints. In: *Resources Policy* 35 (2), S. 98–115.
- Müller, E.; Poller, R.; Hopf, H.; Krones, M. (2013): Enabling Energy Management for Planning Energy-efficient Factories. In: *Procedia CIRP* 7, S. 622–627.
- Namboothiri, S.; Lavoie, P.; Cotton, D.; Taylor, M. (2009): Controlled cooling of aluminium smelting cell sidewalls using heat exchangers supplied with air. In: *TMS-Light Metals*, S. 317–322.
- National Research Council (2007): Minerals, Critical Minerals and the U.S. Economy. Prepublication Version. Hg. v. The national academies press. Washington, USA..
- Norgate, T. E. (2001): A comparative life cycle assessment of copper production processes. CSIRO Mineral Reports. Intec Ltd.; CSIRO. Clayton South, Australia; Sydney, Australia.
- Norgate, T.E; Jahanshahi, S.; Rankin, W.J (2007): Assessing the environmental impact of metal production processes. In: *Journal of Cleaner Production* 15 (8-9), S. 838–848.
- Nowicki, C.; Gosselin, L. (2012): An Overview of Opportunities for Waste Heat Recovery and Thermal Integration in the Primary Aluminium Industry. In: *JOM* 64 (8), S. 990–996.
- Nowicki, C.; Gosselin, L.; Duchesne, C. (2012): Waste Heat Integration Potential Assessment through Exergy Analysis in an Aluminium Production Facility. In: *TMS-Energy Technology 2012: Carbon Dioxide Management and Other Technologies*, S. 165–172.

- O'Callaghan, P.W.; Probert, S.D (1977): Energy management. In: *Applied Energy* 3 (2), S. 127–138.
- Outotec (2013): Outotec Hydrometallurgical Zinc Plants and Processes. Online verfügbar unter http://www.outotec.com/ImageVaultFiles/id_1161/d_1/cf_2/OTE_Outotec_Hydrometallurgical_Zinc_Plants_and_Pro.PDF, zuletzt aktualisiert am 05.06.2013, zuletzt geprüft am 25.11.2013.
- Papp, J. F.; Bray, E. L.; Edelstein, D. L.; Fenton, M. D.; Guberman, D. E.; Hedrick, J. B. et al. (2008): Factors that influence the price of Al, Cd, Co, Cu, Fe, Ni, Pb, Rare Earth Elements, and Zn. Open-File Report 2008-1356. Hg. v. USGS - U.S. Geological Survey und U.S. Department of the Interior.
- Paramguru, R. K.; Rath, P. C.; Misra, V. N. (2004): Trends in red mud utilization - a review. In: *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 26 (1), S. 1–29.
- PE (2014) GaBi 6: Software-System and Databases for Life Cycle Engineering. Stuttgart, Echterdingen.
- Peterson, Ray D.; Belt, Cynthia K. (2009): Elements of an energy management program. In: *JOM* 61 (4), S. 19–24.
- Progress-Aluminium (2012): Effiziente Prozessketten beim Aluminiumdruckguss. Projektsteckbrief. TU Braunschweig; MAGMA Gießereitechnik GmbH, zuletzt geprüft am 22.10.2013.
- Prügl, R.W. (2006): Die Identifikation von Personen mit besonderen Merkmalen. Eine empirische Analyse zur Effizienz der Suchmethode Pyramiding. Doctoral thesis, WU Vienna University of Economics and Business.
- Rankin, J. (2012): Energy use in metal production. CSIRO, Process Science and Engineering, Australia.
- Reibnitz, U., von, Geschka, H., Seibert, S. (1982): Die Szenario-Technik als Grundlage von Planungen. Frankfurt am Main: Batelle-Institut.
- Recyclex (2011): Unsere Geschäftsbereiche / Blei / Präsentation des Geschäftsbereichs. Online verfügbar unter <http://www.recyclex.de/de,nos-activites,plomb,presentation.html>, zuletzt geprüft am 22.11.2013.
- Reichwald, R., Piller, F., (2009): Interaktive Wertschöpfung. Open Innovation, Individualisierung und neue Formen der Arbeitsteilung. Wiesbaden: Gabler, 2. Aufl.
- Reller, A. (2009): Rohstoffsituation Bayern: Keine Zukunft ohne Rohstoffe. Strategien und Handlungsoptionen. Hg. v. vbw Bayern. IW Consult GmbH.
- Ritthoff, M. (2011): I. Gallium. In: *Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Teil 2: Untersuchungen zu ausgewählten Metallen: Gallium, Gold, Indium, Mangan, Nickel, Palladium, Silber, Titan, Zink, Zinn. Meilensteinbericht des Arbeitsschritts 2.1 des Projekts Ma-Ress.* Wuppertalinstitut für Klima, Umwelt und Energie. Wuppertal, S. I.1-I.21.
- Roewer, G. (2014): Konsequenzen der modernen Germaniumchemie. In: Peter Kausch, Martin Bertau, Jens Gutzmer und Jörg Matschullat (Hg.): *Strategische Rohstoffe — Risikovorsorge.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 233–259.
- Ruiz, M. C.; Bello, R.; Padilla, R. (2013): Removal of Arsenic from Enargite Rich Copper Concentrates. In: *Materials Processing Fundamentals*, S. 249–256.
- RUSAL (2013): Inert anode technology. RUSAL. Moskau, Russland. Online verfügbar unter http://rusal.ru/en/development/innovations/inert_anode.aspx, zuletzt aktualisiert am 14.04.2014, zuletzt geprüft am 14.04.2014.
- Sadoway, D. R. (2001): Inert anodes for the Hall-Héroult cell: The ultimate materials challenge. In: *JOM* 53 (5), S. 34-35. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-001-0206-5>.
- Simpson, M.; Hial, Su.; Singh, R. S. (2011): Optimization of Heat Recovery from the Precipitation Circuit. In: *Light Metals 2011*, S. 175–178.
- Sauer, A., Thielmann, A., Isenmann, R. (2016): Modularity in Roadmapping - Integrated foresight of technologies, products, applications, markets and society: The case of "Lithium Ion Battery LIB 2015. Technological Forecast. & Social Change. Online: <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2016.08.017>
- Solheim, A.; Moxnes, B. P.; Vamraak, K.; Haugland, E. (2009): Energy recovery and amperage increase in aluminium cells by active cooling of the anode yokes. In: *Light Metals*, S. 1091–1096.

- Stephan, W.; Zitzmann, K.; Pröbstle, G.; Kapischke, J. (2005): Effiziente Energieverwendung in der Industrie - Teilprojekt „Metallschmelzbetriebe“. Effiziente Energienutzung in Nicht-Eisen-Metall-Schmelzbetrieben. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. Augsburg.
- Sullivan, J.L; Gaines, L. (2012): Status of life cycle inventories for batteries. In: *Energy Conversion and Management* 58, S. 134–148.
- Tan, Reginald B.H; Khoo, Hsien H. (2005): An LCA study of a primary aluminum supply chain. In: *Journal of Cleaner Production* 13 (6), S. 607–618.
- UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Unter Mitarbeit von Rosemarie Benndorf, Maja Bernicke, Andreas Betram, Wolfgang Butz, Folke Dettling, Johannes Drotleff et al. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050-0>, zuletzt geprüft am 24.04.2014.
- Umweltbundesamt (2010): Daten zur Umwelt - Altfahrzeugaufkommen und -verwertung. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodent=2304>, zuletzt geprüft am 18.06.2013.
- Umweltbundesamt (2014a): Cleaner Production Germany. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <http://www.cleaner-production.de/>, zuletzt geprüft am 02.05.2014.
- Umweltbundesamt (2014b): Geförderte Projekte | Umweltinnovationsprogramm. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter http://www.umweltinnovationsprogramm.de/projekte?keys=&field_checkbox_project_status_value=All&page=3, zuletzt geprüft am 02.05.2014.
- United Nations (2011): Towards a green economy. Pathways to sustainable development and poverty eradication. Nairobi, Kenya: UNEP.
- USGS (2013): USGS Minerals Information: Commodity Statistics and Information. Mineral Commodity Summaries. USGS - U.S. Geological Survey, Mineral Resources Program, Minerals Information Team. Reston, Virginia, USA. Online verfügbar unter <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>, zuletzt geprüft am 09.04.2013.
- Varta (1999): Bleirecycling mit System. Das Schachtofenverfahren von Varta. Buchholz / Krautscheid. Online verfügbar unter http://www.company.varta.com/de/content/presse/download/bleirecycling_d.pdf, zuletzt geprüft am 22.11.2013.
- Varta (2012): Umwelt | Recycling. Wir gehen voran beim Recycling von Blei-Säure-Batterien. Online verfügbar unter <http://www.varta-automotive.de/de-de/environment/recycling>, zuletzt geprüft am 15.04.2014.
- VDI (Hrsg.) (2010): Technologieprognosen. Internationaler Vergleich 2010. Düsseldorf: VDI.
- VDMA (2013): Energie- und Ressourceneffizienz. Nachhaltige Hütten- und Walzwerktechnologie. VDMA. Frankfurt.
- Villar, A.; Arribas, J. J.; Parrondo, J. (2012): Waste-to-energy technologies in continuous process industries. In: *Clean Techn Environ Policy* 14 (1), S. 29–39.
- Von Hippel, E., Thomke, S., Sonnack, M. (1999). Creating Breakthroughs at 3M. *Harvard Business Review*, September-Oktober 1999, 47-57.
- Weimer-Jehle W. (2006): Cross-Impact Balances: A System-Theoretical Approach to Cross-Impact Analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 73:4, 334-361.
- Weimer-Jehle, W. (2015): Cross-Impact Analyse. In: Niederberger, M./Wassermann, S. (eds.): *Methoden der Experten- und Stakeholdereinbindung in der sozialwissenschaftlichen Forschung*, Wiesbaden: VS-Verlag: 17-34.
- Woidasky, J.; Ostertag, K.; Stier, C. (Hg.) (2013): Innovative Technologien für Ressourceneffizienz in rohstoffintensiven Produktionsprozessen. Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Fördermaßnahme "r2-innovative Technologien für Ressourceneffizienz - rohstoffintensive Produktionsprozesse" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF). Stuttgart: Fraunhofer-Verl.
- Worrell, E.; Price, L.; Neelis, M.; Galitsky, C.; Zhou, N. (2007): World best practice energy intensity values for selected industrial sectors. Lawrence Berkely National Laboratory. Berkely, California, USA.
- WVM (2001-2013): Metallstatistiken 2000-2012. Hg. v. Wirtschaftsvereinigung Metalle. Berlin. Online verfügbar unter www.wvm-metalle.de, zuletzt geprüft am 04.10.2013.

WVM (2013): Wirtschaftsvereinigung Metalle. Online verfügbar unter http://www.wvmetalle.de/welcome.asp?page_id=185, zuletzt geprüft am 28.10.2013.

Yu, H.; Wang, L. Y.; Du, T. (2011): Waste Heat Recovery and Reuse of Flue Gas in Copper Pyrometallurgy. In: AMM 71-78, S. 2239–2242.

Zhao, Z.; Yang, Y.; Xiao, Y.; Fan, Yo. (2012): Recovery of gallium from Bayer liquor: A review. In: Hydrometallurgy 125-126, S. 115–124.

Zelewski, S., Münchow-Küster, A. (2012): Delphi-Methode – ein Instrument der Zukunftsforschung. In: Zelewski, S.; Münchow-Küster, A. (Hrsg.): Logistiktrends in der Dekade 2010-2020 – eine Delphi-Studie. Logos Verlag, Berlin 2012.

Zimmermann, T.; Rehberger, M.; Gößling-Reisemann, S. (2013): Material Flows Resulting from Large Scale Deployment of Wind Energy in Germany. In: Resources 2 (3), S. 303–334.

Zimmermann, T.; Gößling-Reisemann, S. (2013). Critical materials and dissipative losses: a screening study. Science of The Total Environment, 461-462: 774–80. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.05.040.

Zimmermann, T. (2015). Cycles of Critical Metals: Dissipative Losses and Potential Optimizations: Bremen, Universität Bremen, Diss., 2015.

Zimmermann, T. (2016): Uncovering the Fate of Critical Metals: Tracking Dissipative Losses along the Product Life Cycle. In: Journal of Industrial Ecology 54 (10), S. 28. DOI: 10.1111/jiec.12492.

9 Anhang

Die Anhänge sind bei Bedarf auf Anfrage erhältlich.

Übersicht der Anhänge:

Anhang A: Inputs und Outputs von Schritten der Aluminiumherstellung

Anhang B: Abfrage der Literaturdatenbank Web-of-Knowledge

Anhang C1: Best-Practice Beispiele

Anhang C2: Forschungsvorhaben

Anhang D: Ergebnisse des Expertenworkshops

Anhang E: Fragebogens zur Delphi-Befragung, Runde 1

Anhang F: Maßnahmen nach Anwendung der Entscheidungsregeln und qualitativer Prüfung

Anhang G: Fragebogen zur Delphi-Befragung Runde 2

Anhang H: Ergebnisse der zweiten Befragungsrunde