

# Potenziale und Grenzen der Sekundärrohstoffgewinnung – Ergebnisse der r<sup>4</sup>-Begleitforschung

Antonia Loibl<sup>1,\*</sup>, Frank Marscheider-Weidemann<sup>1</sup>, Katrin Ostertag<sup>1</sup>, Sonja Rosenberg<sup>2</sup>, Luis Tercero Espinoza<sup>1</sup>, Matthias Pfaff<sup>1</sup> und Christian Sartorius<sup>1</sup>

DOI: 10.1002/cite.201900132

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Die sozioökonomischen und ökologischen Wirkungen ausgewählter Vorhaben der BMBF-Fördermaßnahme „r<sup>4</sup> – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe“ werden dargestellt. Viele, aber nicht alle Forschungsvorhaben lassen eine Verbesserung der Versorgungssituation Deutschlands erwarten. In Grenzfällen ist die Hebung der Sekundärrohstoffquellen aber unrentabel oder ökologisch unvorteilhaft. Diese Fälle erfordern eine Abwägung zwischen Versorgungssicherheit und anderen ökonomischen und ökologischen Zielen.

**Schlagwörter:** Kreislaufwirtschaft, Recycling, Ressourceneffizienz, Versorgungssicherheit, Wirkungsanalyse

*Eingegangen:* 06. September 2019; *revidiert:* 10. Februar 2020; *akzeptiert:* 11. Februar 2020

## Potentials and Limits of Secondary Raw Material Provision – Results of the Accompanying Research of the r<sup>4</sup> Funding Program

The socio-economic and ecological impacts of selected projects of the BMBF funding program “r<sup>4</sup> – Innovative Technologies for Resource Efficiency – Research for the Provision of Raw Materials of Strategic Economic Importance” are presented. Many, but not all, research projects indicate a potential improvement of the supply situation in Germany. In some cases, the provision of secondary raw materials is unprofitable or ecologically detrimental. These cases require a balancing between security of supply and other economic and ecological objectives.

**Keywords:** Circular economy, Impact assessment, Recycling, Resource efficiency, Security of supply

## 1 Einleitung

Weltweit steigt der Ressourcenverbrauch kontinuierlich stark an. Bis 2060 wird mit einer Verdopplung des Materialeinsatzes von 79 Gt im Jahr 2011 auf 167 Gt gerechnet [1]. Rohstoffabbau, Verarbeitung und Entsorgung gehen mit enormen ökologischen Folgewirkungen einher. Mehr als die Hälfte der Treibhausgasemissionen können der Nutzung von Materialien zugerechnet werden [1]. Eine Umkehr dieses Trends ist Voraussetzung dafür, dass sich die internationale Staatengemeinschaft in Richtung der mit der Agenda 2030 selbst gesetzten Sustainable Development Goals bewegt und die in Paris vereinbarten Klimaschutzziele erreicht werden. Gleichzeitig sieht sich Deutschland gerade bei wirtschaftsstrategischen Rohstoffen wie Indium, Gallium oder Seltene Erden zunehmenden Risiken bei der Versorgungssicherheit und steigenden Beschaffungskosten ausgesetzt. Diese Rohstoffe spielen für Zukunftstechnologien und die Energiewende aber eine entscheidende Rolle [2] und sind damit auch für die Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands zentral.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Forschung auf der Rohstoff-Nachfrageseite bereits früh erheblich verstärkt und in verschiedenen Förderprogrammen eine Vielzahl von Ressourceneinspar- und Recyclinglösungen vorangebracht [3, 4]. Die Fördermaßnahme „r<sup>4</sup> – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe“ verstärkt nun zusätzlich die Forschung auf der Rohstoff-Angebotsseite. Sie und ihre Vorgängermaßnahmen konkretisieren die Hightech-Strategie der

<sup>1</sup>Dr. Antonia Loibl, Dr. Frank Marscheider-Weidemann, Dr. Katrin Ostertag, Dr. Luis Tercero Espinoza, Dr. Matthias Pfaff, Dr. Christian Sartorius  
antonia.loibl@isi.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe, Deutschland.

<sup>2</sup>Sonja Rosenberg  
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion, Karlsruher Institut für Technologie, Hertzstraße 16, 76187 Karlsruhe, Deutschland.

Bundesregierung [5,6] und sind eingebettet in das BMBF-Programm „Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland“ [7] und damit in das Rahmenprogramm „FONA – Forschung für nachhaltige Entwicklung“ [8].

Ziel der BMBF-Fördermaßnahme  $r^4$  ist es, wirtschaftsstrategische mineralische Primär- und Sekundärrohstoffe in Deutschland verstärkt zu erschließen und dafür technologisch innovative und umweltverträgliche Lösungen zu entwickeln. In dem übergreifenden Integrations- und Transferprojekt  $r^4$ -INTRA wird u.a. untersucht, was die Fördermaßnahme insgesamt im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Versorgungssicherheit erreicht hat. Im FONA-Kontext sind diese Aspekte von besonderer Bedeutung. Im vorliegenden Artikel werden die Beiträge derjenigen Forschungsvorhaben näher beleuchtet, die sich mit Sekundärrohstoffen beschäftigen. Das Fraunhofer ISI und das KIT haben hierfür gemeinsam Abschätzungen der Potenziale zur Erhöhung der Ressourceneffizienz vorgenommen und den ökologischen und sozioökonomischen Nutzen quantifiziert. Die Analysemethoden wurden so gewählt und gestaltet, dass möglichst viele Projekte miteinander aggregiert bzw. verglichen werden konnten. Abb. 1 zeigt die durchgeführten Schritte im Überblick.

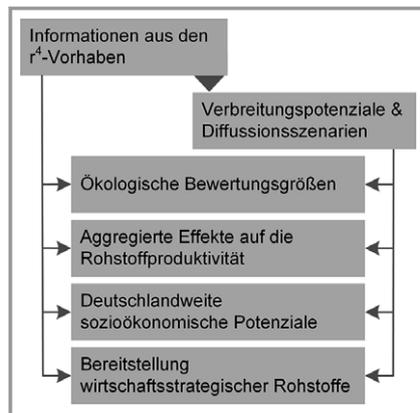


Abbildung 1. Arbeitsschritte zur Potenzial- und Nutzenanalyse der Fördermaßnahme  $r^4$ .

## 2 Bereitstellung von Sekundärrohstoffen entlang des anthropogenen Rohstoffkreislaufes

Zum Thema der Gewinnung von Rohstoffen aus sekundären Quellen werden in  $r^4$  20 Vorhaben sowie eine interdisziplinäre Nachwuchsforschergruppe gefördert. Da die Bekanntmachung [9] technologieoffen sowie offen für alle als wirtschaftsstrategisch angesehenen Rohstoffe war, gibt es keine vorgegebene Struktur entlang bestimmter Industrien, Ausgangsmaterialien, Zielrohstoffe oder eingesetzter Technologien. Die  $r^4$ -Vorhaben sind heterogen in diesen vier Dimensionen und liefern dennoch Beiträge in

praktisch allen relevanten Stufen des anthropogenen Rohstoffkreislaufes (Abb. 2).

Eine mögliche Klassifizierung entsteht aus der Lage im Rohstoffkreislauf:

- Vorhaben, die Rohstoffe aus Halden zurückgewinnen: Zwei Vorhaben widmen sich der Rückgewinnung von Rohstoffen wie Baryt, Rhenium, Germanium und Zink aus Bergbauhalden und Halden für metallurgische Abfälle. Die daraus abgeleiteten Forschungsergebnisse sind zwingendermaßen standortgebunden und deren Potenzial auf die untersuchten Halden limitiert. Dennoch ergeben sich hieraus Anhaltspunkte für andere Standorte mit ähnlichen Randbedingungen.
- Vorhaben, die feste oder flüssige Industrieabfälle (Metallurgie und Fertigung) als Ausgangsmaterial nutzen: Zehn Vorhaben widmen sich der Aufbereitung von festen und flüssigen Industrieabfällen mit dem Ziel der Rohstoffrückgewinnung. Ausgangsmaterialien sind z. B. Stäube, Asche und Schlacke aus der Metallurgie, Kohlefaser-Produktionsabfälle sowie Prozessabwässer aus der Halbleiterherstellung, Katalysatorherstellung oder Metallverarbeitung.
- Vorhaben, die sich dem Recycling von End-of-Life-Produkten aus Industrie/Gewerbe und Haushalten widmen: Zwölf Vorhaben nutzen End-of-Life-Produkte (sog. Post-Consumer oder Altschrotte) als Ausgangsmaterial. Ihre Beiträge umfassen spezifische Schrottarten, die heute schon in bedeutenden Mengen vorkommen wie z. B. Autokatalysatoren, bestimmte Bestandteile von Elektroaltgeräten und flammgeschütztes Plastik. Aber auch Stoffströme, die heute mengenmäßig noch nicht sehr gewichtig sind, in Zukunft jedoch in höherem Maße auftreten dürften, werden adressiert. Dies betrifft vor allem Lithium-Ionen-Batterien und Elektromotoren, die für die Elektromobilität essenziell sind, sowie Magnete und Komposite, die darüber hinaus für Windkraftanlagen bedeutsam sind. Ferner werden Beiträge zur Sensorik und Prozessführung geliefert, die einen besseren Umgang mit komplexer werdenden Produkten ermöglichen könnten.

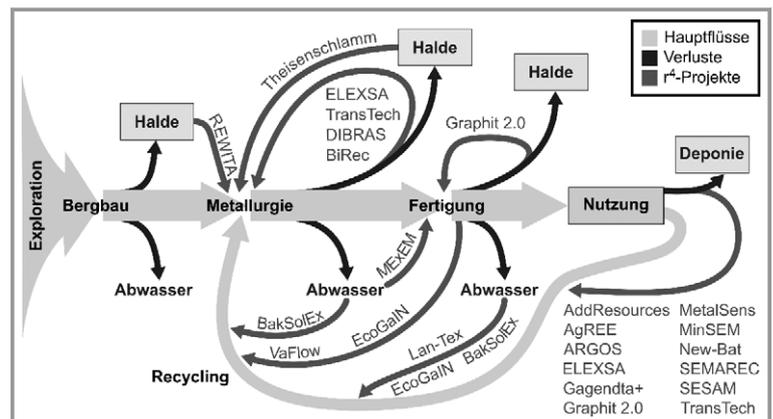


Abbildung 2. Verortung der  $r^4$ -Vorhaben entlang des anthropogenen Rohstoffkreislaufes.

### 3 Potenzial- und Nutzenanalyse der Fördermaßnahme r<sup>4</sup>

#### 3.1 Datenbasis

Die Daten für die Wirkungsanalyse der Forschungsprojekte in r<sup>4</sup> umfassen Angaben v. a. zu Ausgangs- und Endstoffen, zum Energieverbrauch, zu Emissionen und zu Investitionen. Die Betrachtung der Prozesse als Blackbox ist für die Aggregation und den Vergleich vieler Projekte zweckdienlich. Allerdings ist der Informationsgehalt für jedes Projekt geringer als bei einer tiefergehenden, modellbasierten Analyse wie z. B. in [10] gezeigt. Entscheidend für die Bewertung der Innovation ist hier die Verbesserung gegenüber dem Stand der Technik. Zusätzlich wurden die Vorhaben zu den Anwendungsgebieten und -perspektiven befragt. Abb. 3 zeigt den Untersuchungsrahmen für jedes einzelne Vorhaben.

Grundlage für die Analyse der aus den r<sup>4</sup>-Projekten für ganz Deutschland resultierenden Vorteile für Umwelt, Versorgungssicherheit und Wirtschaft sind die Stoffflussdaten aus den einzelnen Projekten. Die Datenlage variiert etwas je nach betrachtetem Parameter. In allen Dimensionen konnten sich die Abschätzungen aber auf 10 oder mehr Fälle stützen (Tab. 1).

Die Primärdaten beziehen sich zumeist auf eine einzelne Anlage im Labor- oder Pilot-Maßstab. Es ist also zusätzlich

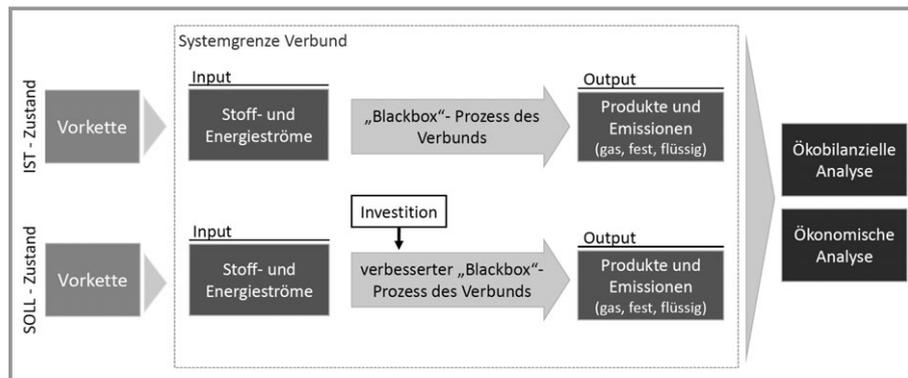


Abbildung 3. Untersuchungsrahmen der Potenzial- und Nutzenanalyse.

Tabelle 1. Datenverfügbarkeit aus der Befragung der Sekundärrohstoff-Vorhaben.

(Stand: 02.09.2019)	Angaben vorhanden	Angaben nicht verfügbar	Bisher noch keine Angaben
Wirtschaftlichkeit	11	7	3
Rohstoffaufwand	12	5	4
Energieaufwand	10	5	6
Emissionen CO <sub>2</sub> -Äquivalente	10	5	6
Versorgungssicherheit	14*	4	3
Volkswirtschaftliche Bedeutung	11	4	6

\*davon auswertbar: 11.

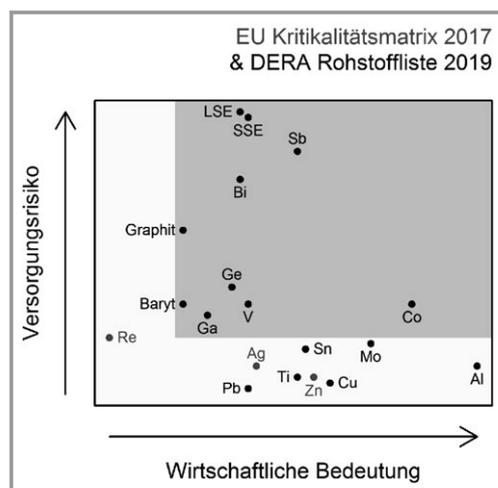
erforderlich abzuschätzen, inwieweit diese Anlagen in der industriellen Anwendung hochskaliert werden können und wie viele dieser Anlagen dann voraussichtlich eingesetzt werden, um die deutschlandweite Wirkung abzuschätzen. Der Ansatz für diese Abschätzung ist nachfrageorientiert, d. h. es wird erhoben, in welchem Umfang bspw. spezifische Ausgangsstoffe (beim Recycling von Elektronikschrott also die Menge an Elektronikschrott) anfallen und mit dem Verfahren behandelt werden könnten. Außerdem wird angenommen, dass diese Potenziale vollständig ausgeschöpft werden, so dass ökologische, wirtschaftliche oder Versorgungsvorteile möglichst umfassend zum Tragen kommen. Da besondere Umstände, die die Umsetzung der Verfahren einschränken könnten, nicht berücksichtigt werden, werden diese Potenziale im Folgenden als theoretische Verbreitungspotenziale bezeichnet. Sie liegen den Abschätzungen in den folgenden Abschnitten zugrunde und stellen eine Obergrenze für die positiven bzw. negativen Beiträge der Projekte dar.

#### 3.2 Effekte auf die Versorgungssicherheit Deutschlands mit Rohstoffen

Auf Basis der Datenerhebung zu den einzelnen r<sup>4</sup>-Projekten (s. Abschn. 3.1) und der Analyse ihres theoretischen Verbreitungspotenzials erfolgte eine Bewertung des Einflusses der Projektergebnisse auf die Versorgungssicherheit Deutschlands mit wirtschaftsstrategischen Rohstoffen. Hierfür wurden die von den r<sup>4</sup>-Vorhaben gemeldeten Stoffstromdaten für jedes der entwickelten Verfahren nach dem Einsatz und Ertrag von wirtschaftsstrategischen Rohstoffen analysiert und auf das theoretische Verbreitungspotenzial des Verfahrens skaliert. Dies geschah durch eine Abschätzung der deutschlandweiten Verfügbarkeit des Ausgangsmaterials. Je nach Verfahren und r<sup>4</sup>-Vorhaben waren dies bspw. die anfallenden Mengen an Produktionsabwässern, Abfallaufkommen oder Haldengrößen. Die so errechnete, durch jedes Verfahren maximal in Deutschland produzierbare Menge an Rohstoff wurde ins Verhältnis gesetzt zu dem derzeitigen Bedarf an dem jeweiligen Rohstoff in Deutschland. Soweit verfügbar wurden Produktionsmengen sowie Importdaten aus

dem Bericht „Deutschland – Rohstoffsituation 2017“ der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) für die Ermittlung des deutschen Bedarfs verwendet [11]. In Einzelfällen mussten Bedarfsmengen für die EU herangezogen und durch Abschätzung des deutschen Anteils skaliert werden [11–13]. Erhalten wurde so der Anteil am deutschen Bedarf eines jeden Rohstoffs, der bei maximal möglicher Verbreitung der neu entwickelten Recyclingverfahren gedeckt werden könnte.

Bis Juli 2019 waren Daten von 14  $r^4$ -Vorhaben verfügbar, wovon elf im Sinne der Versorgungssicherheit auswertbar waren. Die entwickelten Verfahren dieser elf Vorhaben behandeln insgesamt 19 verschiedene wirtschaftsstrategische Rohstoffe (Abb. 4). Davon werden zehn in der aktuellen Liste kritischer Rohstoffe der EU genannt [13]. In der DERA (Deutsche Rohstoffagentur)-Rohstoffliste 2019, die Rohstoffe nach der Länderkonzentration und dem gewichteten Länderrisiko in Risikogruppen einteilt, werden 16 der 19 behandelten Rohstoffe mit mindestens einem Teil der Lieferkette in der höchsten Risikogruppe 3 geführt [14]. Dies spricht für eine grundsätzlich hohe Relevanz der  $r^4$ -Forschungsarbeiten in Hinblick auf eine zukünftige Verbesserung der Versorgungslage Deutschlands mit Rohstoffen.



**Abbildung 4.** In den auswertbaren  $r^4$ -Projekten adressierte Rohstoffe mit ihrer Verortung in der Kritikalitätsmatrix der EU sowie der Risikobewertung der DERA Rohstoffliste 2019 [14, 15]. Von der EU als kritisch bezüglich der Versorgungslage bewertete Rohstoffe sind im grau hervorgehobenen Bereich lokalisiert. Rohstoffe, die von der DERA in der höchsten Risikogruppe 3 gelistet werden, sind schwarz dargestellt. LSE, leichte Seltene Erden; SSE, schwere Seltene Erden.

Die Einteilung der potenziellen Beiträge zur Versorgungssicherheit erfolgte auf einer Skala von groß über mittel und gering zu sehr gering. Das entspricht einer Deckung von > 10 %, 10–5 %, 5–1 % bzw. < 1 % des aktuellen deutschen Bedarfs des jeweiligen Rohstoffs durch die entwickelten Verfahren bei voller Ausschöpfung des theoretischen Verbreitungspotenziales. Für zehn Rohstoffe konnten im Rahmen

der  $r^4$ -Fördermaßnahme Verfahren entwickelt werden, die potenziell große oder mittlere Beiträge zur Versorgungssicherheit leisten können. Gleichzeitig konnten für zehn weitere Rohstoffe innerhalb der  $r^4$ -Forschung nur ein geringer oder kein signifikanter Beitrag zur Verbesserung der Versorgungssicherheit erreicht werden (Tab. 2).

**Tabelle 2.** Verteilung der mit  $r^4$ -Verfahren erzielten, potenziellen Beiträge zur Versorgungssicherheit Deutschlands. Die Klassifizierung zwischen sehr gering (< 1 %), gering (1–5 %), mittel (5–10 %) und groß (> 10 %) gibt den Anteil des aktuellen deutschen Bedarfs an, der bei maximaler Verbreitung durch die entwickelten Verfahren gedeckt werden kann.

Potenzieller Beitrag zur Versorgungssicherheit	Anzahl Metalle
groß	7
mittel	3
gering	2
sehr gering	8
Summe	20

Aus Gründen der Geheimhaltungspflicht von projektspezifischen Daten können detaillierte Angaben nur zu Rohstoffen gemacht werden, zu denen mehr als ein Vorhaben Ergebnisse erzielt hat. Dies ist der Fall für die sieben Rohstoffe Aluminium, Antimon, Blei, Kobalt, Kupfer, Silber und Zink (Tab. 3).

**Tabelle 3.** Einschätzung des Beitrags zur Versorgungssicherheit von  $r^4$ -Verfahren zu Rohstoffen (hier ausschließlich Metalle), die in mehr als einem Projekt bearbeitet worden sind.

Rohstoff/Metall	Potenzieller Beitrag zur Versorgungssicherheit
Aluminium	sehr gering
Antimon	groß
Blei	sehr gering
Kobalt	sehr gering
Kupfer	sehr gering
Silber	groß
Zink	gering

Aluminium und Kupfer sind nach Eisen die massenmäßig meistgenutzten Metalle weltweit, und auch der deutsche Bedarf lag 2017 mit 3,9 Mt für Aluminium und 1,6 Mt für Kupfer sehr hoch [11]. Eine Größenordnung kleiner war der Bedarf an Zink (530 kt) und Blei (460 kt), doch auch diese Metalle werden jährlich noch in sehr großen Mengen in Deutschland umgesetzt [11]. Durch die Entwicklung eines einzelnen Recyclingverfahrens für einen spezifischen Abfallstoffstrom kann daher nur sehr schwer ein signifikanter Effekt auf die Versorgungssicherheit Deutschlands

mit diesen massenmäßig großen Rohstoffen erzielt werden. Hinzu kommt, dass für die großen Abfallströme dieser viel genutzten Metalle in Deutschland meist bereits sehr effiziente Recyclingverfahren etabliert sind. Dem entspricht die Einstufung der Beiträge der  $r^4$ -Vorhaben zur sicheren Versorgung Deutschlands mit Aluminium, Kupfer, Zink und Blei als gering bis sehr gering. Keiner dieser vier Rohstoffe wurde von Seiten der EU als kritisch im Sinne der Versorgungssicherheit eingestuft [15]. Die stärker nach Verarbeitungsstufen differenzierte DERA-Rohstoffliste führt Zink mit seiner Bergwerksförderung und Raffinadeproduktion jeweils in der mittleren Risikogruppe 2, Aluminium, Kupfer und Blei jedoch mit mindestens einer Produktionsstufe in der höchsten Risikogruppe 3 [14].

Ebenfalls sehr gering ist der potenzielle Beitrag der hier betrachteten  $r^4$ -Vorhaben zur Versorgung mit dem Technologiemetall Kobalt, das von der EU als kritisch bezüglich der Versorgung angesehen wird und dessen Bergwerksförderung sowie Handel mit Erzen, Konzentraten und Matte wegen einer sehr hohen Konzentration im Kongo von der DERA in Risikogruppe 3 geführt wird [14, 15].

Große Beiträge zur Versorgungssicherheit sind dagegen möglich durch die Verbreitung der innerhalb von  $r^4$  entwickelten Recyclingverfahren für Antimon und Silber. Antimon gehört zu den von der EU bezüglich ihrer Versorgungslage als kritisch eingeschätzten Rohstoffe [15]. Auch in der DERA-Rohstoffliste für Deutschland wird Antimon wegen einer hohen Länderkonzentration und einem mittleren gewichteten Länderrisiko in Bergwerksförderung und Handel von Primärmaterial sowie Antimon-haltigen Abfällen in der Risikogruppe 3 aufgeführt [14]. Antimon gehört dabei in die Gruppe von Metallen, deren Angebot sehr stark durch den chinesischen Staat dominiert und durch Exportrestriktionen kontrolliert wird [16]. Zudem hat es bislang eine niedrige EoL-Recyclingrate, die auf etwa 1–10 % geschätzt wird [17, 18]. Dadurch gibt es ein hohes Potenzial an bisher ungenutzten Ansatzpunkten für Recyclingverfahren. Neben der Verwendung in Blei-Säure-Batterien, Bleilegierungen, Plastik und Glas sowie Keramik, wird der größte Teil als Antimontrioxid in Flammenschutzmitteln verwendet. Der jährliche Bedarf in Deutschland an Antimontrioxid lag 2016 bei etwa 5,7 kt [11]. Wird eine deutschlandweite Anwendung der in  $r^4$  entwickelten Verfahren für das Recycling von Antimontrioxid erreicht, könnten daraus etwa 16 % des aktuellen, deutschen Bedarfes gedeckt werden.

Silber wurde dagegen von der EU nicht als kritisch eingestuft [15]. Und auch in der DERA-Rohstoffliste für Deutschland wird die Bergwerksförderung von Silber sowie der Handel mit Rohsilber nur in Risikogruppe 1 geführt, der Handel mit Erzen, Konzentraten, Silbernitrat und Silberpulver in der mittleren Risikogruppe 2 [14]. Silber wird zu einem großen Teil für Schmuck, Medaillen, Barren und Silberwaren verwendet. Weitere Anwendungen finden sich in Elektronik, Elektrotechnik und Photovoltaik sowie in Legierungen und Loten [11]. Die Recyclingraten schwanken

sehr stark je nach Anwendung und der dafür etablierten Sammelstruktur und liegen für Schmuck bspw. bei über 90 %, bei industriellen Anwendungen jedoch lediglich zwischen 40 und 60 % und bei Elektronik sogar nur bei 10–15 % [17]. Der Bedarf an Silber lag 2017 in Deutschland bei etwa 3,2 kt [11]. Doch durch den zunehmenden Einsatz z. B. in werkstofflich komplexen Anlagenteilen für die chemische Industrie könnte dieser Bedarf in den kommenden Jahren um ca. 10 % steigen. Durch die frühzeitigen technischen Entwicklungen innerhalb der  $r^4$ -Fördermaßnahme kann die Rezyklierung dieses Zuwachses sichergestellt werden. Trotz steigendem Silberbedarf bliebe die Lage Deutschlands aus Sicht der Versorgungssicherheit dann unverändert.

### 3.3 Ökologische Effekte

Die ökologischen Effekte der  $r^4$ -Projekte wurden mittels eines Ökobilanz-orientierten Vorgehens ermittelt. Eine Ökobilanz zeigt auf der Grundlage quantitativer Daten die Umwelteigenschaften von Produkten und Prozessen auf [19]. Das Vorgehen der ökobilanziellen Betrachtung dient in verschiedensten Anwendungsbereichen als Mittel zur Abschätzung der Auswirkungen spezifischer Produkte und Prozesse auf die Umwelt und wurde auch in den vorangegangenen Förderschwerpunkten zur Ermittlung der ökologischen Effekte herangezogen [4, 20]. Das ökologische Potenzial soll dabei Einsparungen beim Rohstoff- und Energieeinsatz sowie den Treibhausgasemissionen aufzeigen und basiert auf den erhobenen Daten der Rohstoff- und Energieströme (s. Abschn. 3.1).

Im Rahmen der Untersuchungen gehen Sekundärmaterialien als Eingangsstoffe in das System ein. Da es aufgrund der Systemgrenzen nicht möglich ist, ein vorheriges Produktleben der Stoffe zu bilanzieren, erfolgt die Bilanzierung nach der Cut-Off-Methode. Bei dieser wird davon ausgegangen, dass der vorherige Lebenszyklus der Sekundärmaterialien an dem Punkt getrennt wird, an dem diese als Eingangsstoff ins System zur Verfügung stehen [21]. Bei der Wirkungsabschätzung gehen somit die Sekundärmaterialien ohne Werte für die Wirkungskategorien in die Berechnung ein. Dies ermöglicht es, die Allokationsgrenzen für alle Projekte eindeutig zu ziehen. Die Ergebnisse sind damit losgelöst von der vorherigen Nutzung und ökologischer Belastung der Ausgangsstoffe zu interpretieren.

Die Analyse umfasst die gleichen drei Wirkungskategorien wie die Untersuchungen im Kontext der  $r^2$ - und  $r^3$ -Förderlinien [4, 20]: den kumulierten Materialaufwand, den Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen. Zwecks Anonymisierung der Ergebnisse einzelner Projekte erfolgt die Darstellung der ökologischen Ergebnisse differenziert nach den Projektclustern Produktabfall, Prozessabfall und Prozessabwasser (Abb. 5). Jedes Projekt ist bei dieser Analyse nur einem Cluster zugeteilt. Die beiden Cluster Produktabfall und Prozessabfall zeigen in allen drei

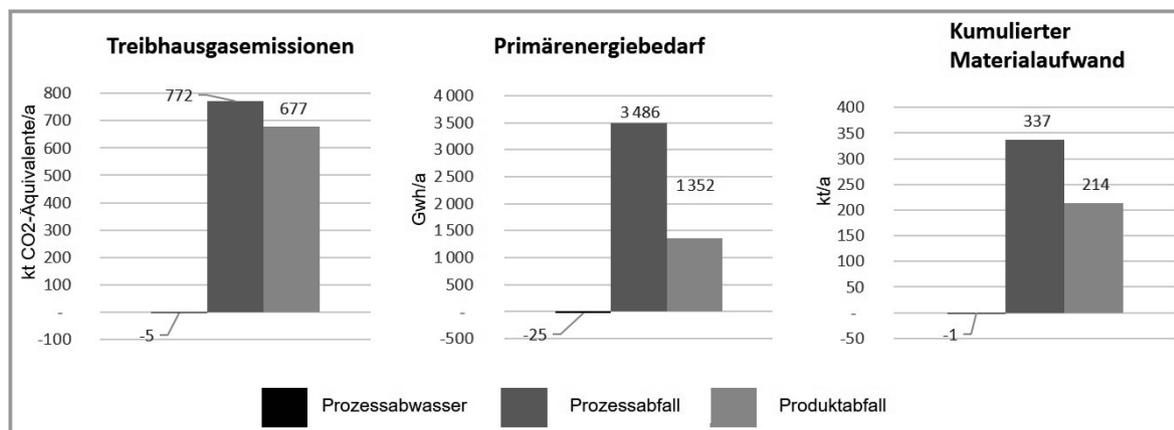


Abbildung 5. Ökologische Einspareffekte auf Ebene der Projektcluster.

Wirkungskategorien Einsparungspotenziale, während das Cluster Prozessabwasser zu leichten Mehraufwänden führen würde. Insgesamt könnten bei deutschlandweiter Umsetzung aller betrachteten  $r^4$ -Lösungen pro Jahr rund 1450 kt CO<sub>2</sub>-Äquivalente und 4800 GWh Primärenergie eingespart werden. Werden die gesamten CO<sub>2e</sub>-Emissionen [22] und der gesamte Primärenergieverbrauch Deutschlands [23] als Vergleich herangezogen und daraus Pro-Kopf-Werte berechnet, entsprechen diese Zahlen in etwa dem jährlichen CO<sub>2e</sub>-Ausstoß von 140 000 Einwohnern in Deutschland und einem jährlichen Primärenergieverbrauch von ca. 110 000 Einwohnern. Die Einsparung des kumulierten Materialaufwands beläuft sich auf ca. 550 kt a<sup>-1</sup>.

Werden für ein Cluster positive ökologische Effekte (Einsparungen) ausgewiesen, so bedeutet dies nicht, dass bei einer Umsetzung jedes einzelne enthaltene Projekt positive ökologische Effekte mit sich bringt. Dies gilt mit umgekehrtem Vorzeichen auch für das Cluster Prozessabwasser. Auch wenn negative Einsparungen, d. h. ein ökologischer Mehraufwand auftritt, muss dies vor dem Hintergrund betrachtet werden, dass bei einer deutschlandweiten Umsetzung in industriellen Anlagen Prozessverbesserungen z. B. durch die Nutzung von Energie aus anderen Prozessen denkbar sind, die im Rahmen der erfolgten Analyse nicht abbildbar sind. Darüber hinaus können auch ökologische Ressourceneffizienzpotenziale nicht abgebildet werden, die sich durch eine Übertragung der Technologie auf andere, hier noch nicht berücksichtigte Anwendungen ergeben [4].

### 3.4 Beitrag zur Gesamtrohstoffproduktivität

Ein Nachhaltigkeitsziel der Bundesregierung ist die Steigerung der Gesamtrohstoffproduktivität. Diese setzt die Summe der Werte allen Konsums, aller Investitionen und aller Exporte Deutschlands – die sog. „letzte Verwendung“ – in Relation zu den Rohstoffentnahmen und Importen (gemessen in Rohstoffäquivalenten). Sie ist ein Maß dafür, welche Werte an Gütern und Dienstleistungen mithilfe der in An-

spruch genommenen Rohstoffe produziert wurden. Der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie zufolge soll die Steigerung dieses Indikators auf dem Stand des Zeitraums 2000 bis 2011, d. h. bei +1,5 % p. a., gehalten werden, d. h. bei einer Steigerung der gesamten deutschen Wertschöpfung um 1,5 % pro Jahr müsste die Rohstoffinanspruchnahme konstant bleiben [24].

Um den Beitrag von  $r^4$  zu diesem Ziel zu bestimmen, wurden, soweit die Daten verfügbar waren, für alle Projekte die Stoffflüsse auf Input- und Outputseite rohstoffspezifisch mit den kumulierten Rohstoffaufwänden (KRA) gewichtet und saldiert. Die rohstoffspezifischen KRA-Werte wurden von [25] übernommen oder, soweit dort nicht verfügbar, auf Basis ihres Preises abgeschätzt.<sup>1)</sup> Diese Berechnungen erfolgten sowohl für das erforschte, innovative (SOLL-Zustand) als auch, soweit vorhanden, für das bestehende Verfahren (IST-Zustand). Die Daten wurden dann auf ihr jeweiliges theoretisches Verbreitungspotenzial extrapoliert. Es zeigte sich, dass von den zwölf Projekten, für die die erforderlichen Daten zur Verfügung standen, acht einen positiven Beitrag zur Reduzierung des KRA leisteten, d. h. der KRA des innovativen Verfahrens war geringer als der des bisher genutzten Verfahrens bzw. des Status quo. Zwei Verfahren leisteten hingegen keinen Beitrag zur Senkung des KRA und zwei weitere trugen sogar zu dessen Vergrößerung bei.

Bleibt ein Verfahren unberücksichtigt, das aller Voraussicht nach aus wirtschaftlicher und ökologischer Perspektive nicht sinnvoll ist, und ein anderes, weil seine Wirkung unsicher ist und wegen des Zugriffs auf die gleiche Input-Basis mit einem anderen Verfahren konkurriert, resultiert ein theoretisches Gesamt-KRA-Einsparpotenzial in Höhe

1) Die doppelt-logarithmische Darstellung des spezifischen KRA verschiedener Rohstoffe in Abhängigkeit vom jeweiligen Preis ergibt einen linearen Zusammenhang mit einem  $R^2$  von knapp 0,9. Preisdaten von 2010 wurden für diese Interpolation gewählt, weil die Ergebnisse besser als andere Jahrgänge mit den EcoInvent-Daten korrelieren, die für die Abschätzung der anderen ökologischen Wirkungen verwendet wurden.

von 3,42 Mio. Tonnen Rohstoffäquivalenten (RÄ) pro Jahr.<sup>2)</sup> Demgegenüber entspräche eine Steigerung der Gesamtrohstoffproduktivität um 1,5 % bei unveränderter Wirtschaftsleistung einer Senkung des gesamten deutschen Rohstoffeinsatzes (*raw material input*, mit „Rucksack“) um 39,6 Mio. Tonnen. Alle  $r^4$ -Verfahren (von denen die entsprechenden Zahlen verfügbar sind) zusammen würden also, wenn sie in einem Jahr umgesetzt werden könnten, zu einer Steigerung der Rohstoffproduktivität um 0,13 % beitragen (s. Abb. 6).

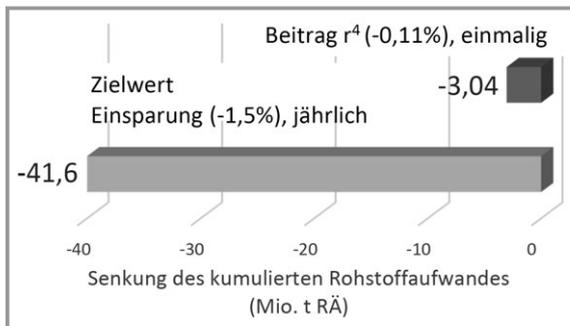


Abbildung 6. Rohstoffeinsparpotenzial untersuchter  $r^4$ -Vorhaben im Vergleich zum Zielwert der Bundesregierung.

### 3.5 Wirtschaftliche Effekte

Auf Basis der Stoffstromdaten und der Angaben zu Investitionsbedarfen wurden unter Hinzuziehen von Preisdaten und ergänzenden Angaben aus der Literatur Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit der in  $r^4$  entwickelten Verfahren gemacht. Dazu wurde eine Kapitalwert-orientierte Betrachtung angestellt. Auf dieser Basis konnten folgende Einschätzungen getätigt werden (Die Ergebnisse für einzelne Projekte können hier aus Gründen der Vertraulichkeitswahrung nicht dargestellt werden.):

- Die innovativen Verfahren aus vier Projekten erwiesen sich als hoch wirtschaftlich.
- Bei einem Projekt ist in Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit kein eindeutiger Vorteil auszumachen, da die Erlöse die Kosten nicht übersteigen. Dieser Befund könnte sich zum Positiven wenden, wenn durch weitere Fortschritte die Kosten gesenkt oder durch einen Preisanstieg bei den zurückgewonnenen Rohstoffen die Erlöse steigen würden.

2) Der Unterschied zwischen der in  $r^4$  erzielbaren Reduktion von kumuliertem Materialaufwand (KMA; 0,55 Mio. t) und KRA (3,42 Mio. t) ist auf die unterschiedlichen Datenbasen zurückzuführen. Die EcoInvent-Daten werden standardmäßig für Ökobilanzen und die Berechnung des KMA verwendet und berücksichtigen nur physische Vorketten. Die für die Berechnung der Gesamtrohstoffproduktivität maßgeblichen ifeu-Daten [25] berücksichtigen zusätzlich Verflechtungen der verschiedenen Wirtschaftszweige, wodurch der berücksichtigte Rohstoffrucksack größer ist.

- Bei vier weiteren Verfahren ist die wirtschaftliche Prognose deutlich schlechter, wobei für eine endgültige Aussage die Datenbasis zu unvollständig ist.
- Schließlich werden zwei Technologien nach Maßgabe der Daten und auch unter Berücksichtigung möglicher langfristiger Verbesserungen der Rahmenbedingungen aller Voraussicht nach nicht wirtschaftlich sein.

Wie das Beispiel der Solarzellen zeigt, können auch (anfänglich) ausgesprochen unwirtschaftliche Technologien eine weite Verbreitung finden, wenn sie bspw. von Seiten des Staates eine Förderung erfahren und so über Lerneffekte allmählich in die Wirtschaftlichkeit hineinwachsen. Von daher sind die oben getroffenen Einschätzungen nicht endgültig.

Die Diffusion der betrachteten Effizienztechnologien hat auch Auswirkungen auf gesamtwirtschaftlicher Ebene. Im vorliegenden Beitrag werden vorrangig Effekte auf Beschäftigung und Importe betrachtet. Die verschiedenen deutschen Produktionsbereiche sind unterschiedlich von diesen Wirkungen betroffen, sowohl in Folge direkter Impulse der effizienzsteigernden Maßnahmen als auch in Folge indirekter Entwicklungen auf gesamtwirtschaftlicher Ebene. Es kommt somit auch zu strukturellen Verschiebungen zwischen Produktionsbereichen. Die Methode zur Berechnung der gesamtwirtschaftlichen Effekte kann [26] entnommen werden.

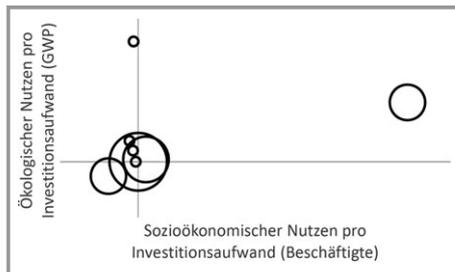
Da nur ein Teil der betrachteten Vorhaben rentabel ist, sind die zu erwartenden gesamtwirtschaftlichen Impulse, die von ihnen ausgehen, sehr gering. Entsprechend gering fallen die gesamtwirtschaftlichen Effekte aus. So ist deutschlandweit lediglich mit ca. 1000 zusätzlichen Arbeitsplätzen zu rechnen, die hauptsächlich im verarbeitenden Gewerbe und den Dienstleistungen anfallen. Primärrohstoffbereitstellende Sektoren verzeichnen hingegen geringe Beschäftigungsrückgänge. Gleichzeitig führen die Effizienztechnologien zu einem – allerdings ebenfalls geringfügigen – Rückgang von Rohstoffimporten, der hauptsächlich auf Nichteisenmetalle entfällt. Hier ist eine Reduktion der Importe um 100 Mio. € jährlich möglich. Im Gegensatz dazu erhöhen sich die Importe von Maschinen und Elektronik. Insgesamt ist mit einer Reduktion der Importe um 45 Mio. € pro Jahr zu rechnen.

Unabhängig von der geringen Größe der Effekte ist anzumerken, dass die Maßnahmen zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe keinen negativen Einfluss auf die deutsche Wirtschaft haben. Versorgungssicherheit und eine Verbesserung der ökologischen Situation gehen somit auf gesamtwirtschaftlicher Ebene nicht mit negativen ökonomischen Effekten einher.

## 4 Diskussion

Entsprechend dem Ziel der BMBF-Fördermaßnahme  $r^4$  wurden in den hier betrachteten Forschungsvorhaben, die sich mit Sekundärrohstoffen beschäftigen, insgesamt 19 verschiedene wirtschaftsstrategische Rohstoffe behandelt,

wovon die Mehrzahl unter die kritischen Rohstoffe nach EU-Definition fällt oder in der DERA-Rohstoffliste geführt wird. Dies zeigt die gute strategische Ausrichtung der  $r^4$ -Forschungsarbeiten in Hinblick auf eine zukünftige Verbesserung der Versorgungslage Deutschlands. Dabei wurden auch Synergien zwischen Spezial- und Massenrohstoffen berücksichtigt. Einige  $r^4$ -Lösungen bergen tatsächlich ein hohes Potenzial zur Steigerung der Versorgungssicherheit (s. große Kreise in Abb. 7).



**Abbildung 7.** Ökologische vs. sozioökonomische Effekte vs. Versorgungssicherheit. Jeder Kreis repräsentiert ein Projekt. Die Größe der Kreise entspricht dem Einfluss auf die Versorgungssicherheit für den Rohstoff, für den das Projekt die größte Wirkung erzielen konnte.

Ziel der Begleitforschung war es, den Anforderungen von FONA gemäß den Blick über die Versorgungssicherheit hinaus auch auf andere Anforderungen der Nachhaltigkeit zu richten und den Beitrag der  $r^4$ -Lösungen insgesamt hierzu zu konkretisieren. In diesen Untersuchungen zu ökonomischen und ökologischen Aspekten werden teilweise Grenzbereiche deutlich. Diese Grenzen äußern sich darin, dass die Wiedergewinnung von (Sekundär-)Rohstoffen mit umso mehr Aufwand (physisch und wirtschaftlich) verbunden ist, je weiter sie getrieben wird, d. h. je höher die Rückgewinnungsquoten sind, die erzielt werden sollen, und je komplexer das Ausgangsmaterial ist. Ursache dafür ist, dass die Quellen mit hohen Rohstoffkonzentrationen und einfacher Aufbereitung aus Wirtschaftlichkeitsgründen zuerst ausgebeutet werden und die dann verbleibenden Quellen immer geringere Konzentrationen und immer höhere Aufbereitungsanforderungen aufweisen. Dieser Zusammenhang ist in der Gewinnung von Primärrohstoffen schon lange bekannt und auch in der Forschung zu Recycling etabliertes Wissen. Dass diese Grenzbereiche inzwischen aber in der Forschung tatsächlich vereinzelt erreicht werden, ist in der breiteren Fachdiskussion zu Recycling noch neu. Aus dieser Perspektive erscheint in Hinblick auf zukünftige Arbeiten eine tiefere Analyse (vgl. [10]) besonders sinnvoll, um Optimierungspotenziale aufzudecken und Beiträge (positiv wie negativ) besser zu verstehen.

Die Entwicklung neuer Recyclingverfahren dringt also in Bereiche vor, in denen in einzelnen Fällen die Rohstoffgewinnung aus sekundären Quellen mit einem Rohstoffmehraufwand gegenüber der Gewinnung aus primären Quellen einhergeht. In diesem Fall stehen Versorgungssicherheit und ökologische oder ökonomische Wirkung teil-

weise in Konkurrenz zueinander, so dass zwischen ihnen abzuwägen ist. Diese Zielkonflikte zeigt Abb. 7. In dieser Situation macht ein Primat für die Versorgungssicherheit zulasten von Ökologie oder Wirtschaftlichkeit nur kurzfristig Sinn, um plötzliche Engpässe zu überbrücken. Längerfristig stellt sich die Frage, wie die gewünschten Funktionen, die letztlich den Rohstoffbedarf begründen, rohstoffseitig bedient und die Zielkonflikte gleichzeitig entschärft oder aufgehoben werden können.

Im Rahmen von  $r^4$  wurden auch Projekte gefördert, in denen neue Verfahrensansätze getestet werden konnten. Diese erzielten nicht immer große bzw. positive Effekte, liefern aber Grundlagen für weitere Entwicklungen. In anderen besteht das Potenzial, durch Sekundärrohstoffgewinnung die Produktion einzelner Metalle wieder zurück nach Deutschland zu holen. Die Wirtschaftlichkeit einer langfristigen Investition in ein Recyclingverfahren ist allerdings abhängig von den mit den wiedergewonnenen Metall(gemisch)en erzielbaren Erlösen und somit von den Metallpreisen. Diese sind mit hohen Unsicherheiten behaftet.

Schließlich zeigt sich in  $r^4$  eine sehr vorausschauende Definition von Forschungsfragen: Bei einigen Vorhaben fallen derzeit noch nicht genügend Inputstoffe (z. B. Li-Ionen-Altakbatterien, Alt-NdFeB-Magneten) an, um eine Pilotanlage zu betreiben. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dies in Zukunft der Fall sein wird. Die Weiterentwicklung dieser Lösungen muss deshalb Projektionen zukünftiger Stoffströme sowie Trends in der Zusammensetzung und im Design von Produkten als Rahmenbedingung adäquat berücksichtigen, damit die Lösungen passfähig zu zukünftigen Marktsituationen sind.

Das diesem Artikel zugrundeliegende Vorhaben  $r^4$ -INTRA wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033R124 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die Autoren bedanken sich beim BMBF für die Förderung, beim PtJ für die gute Betreuung und bei den  $r^4$ -INTRA-Konsortialpartnern – CUTEC Forschungszentrum, BGR und Hochschule Pforzheim – für die vertrauensvolle Zusammenarbeit in der Begleitforschung und die Unterstützung bei der Datenerhebung.

## Abkürzungen

KMA	kumulierter Materialaufwand
KRA	kumulierter Rohstoffaufwand
LSE	leichte Seltene Erden
RÄ	Rohstoffäquivalente
SSE	schwere Seltene Erden

## Literatur

- [1] *Global Material Resources Outlook to 2060 – Economic Drivers and Environmental Consequences: Highlights*, OECD, Paris **2018**.
- [2] F. Marscheider-Weidemann, S. Langkau, T. Hummen, L. Erdmann, L. Tercero Espinoza, G. Angerer, M. Marwede, S. Benecke, *Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016*, DERA Rohstoffinformationen, Bd. 28, Deutsche Rohstoffagentur (DERA), Berlin **2016**.
- [3] K. Ostertag, F. Marscheider-Weidemann, J. Niederste-Hollenberg, P. Paitz, C. Sartorius, R. Walz, B. Moller, R. Seitz, J. Woidasky, C. Stier, S. Albrecht, C. P. Brandstetter, M. Fröhling, F. Trippe, J. Müller, W. A. Mayer, M. Faulstich, Ergebnisse der r<sup>2</sup>-Begleitforschung: Potenziale von Innovationen in rohstoffintensiven Produktionsprozessen, in *Innovative Technologien für Ressourceneffizienz in rohstoffintensiven Produktionsprozessen: Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Fördermaßnahme „r<sup>2</sup> – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Rohstoffintensive Produktionsprozesse“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)* (Eds: J. Woidasky, K. Ostertag, C. Stier), Fraunhofer Verlag, Stuttgart **2013**.
- [4] *Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien: Ergebnisse der r<sup>3</sup>-Fördermaßnahme* (Eds: A. Dürkoop, C. P. Brandstetter, G. Gräbe, L. Rentsch), Fraunhofer Verlag, Stuttgart **2016**.
- [5] *Die neue Hightech-Strategie – Innovationen für Deutschland*, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin **2014**.
- [6] *Forschung und Innovation für die Menschen: Die Hightech-Strategie 2025*, BMBF, Berlin **2018**.
- [7] *Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den Hightech-Standort Deutschland: Forschungs- und Entwicklungsprogramm des BMBF für neue Rohstofftechnologien*, BMBF, Bonn **2012**.
- [8] *Forschung für Nachhaltige Entwicklung – FONA<sup>3</sup>: Rahmenprogramm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung*, BMBF, Bonn **2016**.
- [9] *Bekanntmachung des Bundesministeriums von Richtlinien zur Fördermaßnahme „r<sup>4</sup> – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe“ für Bildung und Forschung*, BMBF, Bonn **2013**. [www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-870.html](http://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-870.html)
- [10] A. Abadías Llamas, A. Valero Delgado, A. Valero Capilla, C. Torres Cuadra, M. Hultgren, M. Peltomäki, A. Roine, M. Stelter, M. A. Reuter, Simulation-based exergy, thermo-economic and environmental footprint analysis of primary copper production, *Miner. Eng.* **2019**, 131, 51–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.007>
- [11] *Deutschland – Rohstoffsituation 2017*, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover **2018**.
- [12] *Study on the Review of the List of Critical Raw Materials: Non-critical Raw Materials Factsheets*, European Commission, Brussels **2017**.
- [13] *Study on the Review of the List of Critical Raw Materials: Critical Raw Materials Factsheets*, European Commission, Brussels **2017**.
- [14] *DERA-Rohstoffliste 2019: Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – Potenzielle Preis- und Lieferrisiken*, DERA Rohstoffinformationen, Bd. 40, DERA, Berlin **2019**.
- [15] *Study on the Review of the List of Critical Raw Materials: Criticality Assessments*, European Commission, Brussels **2017**.
- [16] *DERA-Rohstoffliste 2016: Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – Potenzielle Preis- und Lieferrisiken*, DERA Rohstoffinformationen, Bd. 32, DERA, Berlin **2016**.
- [17] *Recycling Rates of Metals – A Status Report*, United Nations Environment Programme (UNEP), Paris **2011**.
- [18] *Metal Recycling – Opportunities, Limits, Infrastructure*, UNEP, Paris **2013**.
- [19] EN ISO 14040:2006, *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*, Beuth, Berlin **2009**.
- [20] S. Albrecht, P. Brandstetter, M. Fröhling, K. Sedlbauer, F. Schultmann, F. Trippe, *Abschätzung der Ressourceneffizienz-Potenziale in der Fördermaßnahme r<sup>2</sup>: Abschlussbericht zum Arbeitspaket „Sozio-ökonomische und ökologische Bewertung“ im Rahmen des Integrations- und Transferprojekts der BMBF-Fördermaßnahme r<sup>2</sup> „Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – rohstoffintensive Produktionsprozesse“*, Karlsruhe/Stuttgart **2013**.
- [21] W. Klöpffer, B. Grahl, *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*, Wiley-VCH, Weinheim **2009**.
- [22] *Graphiken und Tabellen zur Klimabilanz 2018*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, **2019**. [www.umweltbundesamt.de/galerie/grafiken-tabellen-zur-klimabilanz-2018](http://www.umweltbundesamt.de/galerie/grafiken-tabellen-zur-klimabilanz-2018)
- [23] *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen legt Bericht zum Energieverbrauch 2018 vor*, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Berlin **2019**. [https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=ageb\\_pressedienst\\_02\\_2019.pdf](https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_pressedienst_02_2019.pdf)
- [24] *Nachhaltige Entwicklung in Deutschland: Indikatorenbericht 2016*, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden **2017**.
- [25] J. Giegriech, A. Liebich, C. Lauwigi, J. Reinhardt, *Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion*, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau **2012**.
- [26] R. Walz, C. Dreher, F. Marscheider-Weidemann, C. Nathani, E. Schirmmeister, J. Schleich, R. Schneider, M. Schön, *Arbeitswelt in einer nachhaltigen Wirtschaft – Analyse der Wirkungen von Umweltschutzstrategien auf Wirtschaft und Arbeitsstrukturen*, Texte 44/01, Umweltbundesamt, Berlin **2001**.

DOI: 10.1002/cite.201900132

## Potenziale und Grenzen der Sekundärrohstoffgewinnung – Ergebnisse der r<sup>4</sup>-Begleitforschung

A. Loibl\*, F. Marscheider-Weidemann, K. Ostertag, S. Rosenberg, L. Tercero Espinoza, M. Pfaff, C. Sartorius

**Forschungsarbeit:** Dargestellt wird der potenzielle Beitrag ausgewählter r<sup>4</sup>-Lösungen zur Steigerung der Versorgungssicherheit und zu weiteren ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeitszielen, wie z. B. zur Reduktion von Treibhausgasen, zur Erhöhung der Gesamtrohstoffproduktivität und zu höherer Beschäftigung. Die Grenzen von Recycling werden diskutiert. ....

