Methodisches Vorgehen

4

In diesem Kapitel ist das methodische Vorgehen beschrieben, anhand dessen die eingangs formulierten Forschungsfragen (1), (2) und (3) beantwortet sind. Nach der Definition des Untersuchungsrahmens und der Systemgrenzen (Abschnitt 4.1) sind die theoretischen Grundlagen der Modellbildung der Recyclingsysteme erläutert (Abschnitt 4.2). Für diese Modelle sind umfangreiche Datengrundlagen notwendig. Wie diese Daten ermittelt sind und wie in diesem Zusammenhang mit Unsicherheiten und Allokationsproblematiken umgegangen wird, ist in Abschnitt 4.3 behandelt. Um die zentrale Forschungsfrage (3) der Arbeit zu beantworten – bis zu welcher EoL-RQ Recycling praktiziert werden sollte – ist abschließend eine Optimierungsmethode ausgewählt und ausführlich beschrieben (Abschnitt 4.3.5).

4.1 Untersuchungsrahmen und Systemgrenzen

Ein wesentliches Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die sekundäre Produktion, also das Recycling von Metallen aus den verfügbaren sekundären Quellen, anhand der damit verbundenen KEA zu bewerten (Forschungsfrage (1)). Die sekundären Quellen sind dabei ab dem Ort ihres Anfallens betrachtet. Einbezogen sind damit z. B. auch Elektroaltgeräte, die nicht in eine dafür vorgesehene Sammlung gehen, sondern über den Hausmüll entsorgt werden und damit erst in der Verbrennungsasche der Siedlungsabfälle als entsprechende sekundäre Quelle anfallen. Der Untersuchungsrahmen ist auf Deutschland und ein Jahr festgelegt. D. h. für

Elektronisches Zusatzmaterial Die elektronische Version dieses Kapitels enthält Zusatzmaterial, das berechtigten Benutzern zur Verfügung steht
https://doi.org/10.1007/978-3-658-32924-2_4

die Berechnung der EoL-RQ sind alle sekundären Quellen berücksichtigt, die innerhalb eines Jahres in Deutschland anfallen und demnach für ein potenzielles Recycling zur Verfügung stehen. Deutschland ist ausgewählt, da hier aufgrund der etablierten Recyclinginfrastruktur mit modernsten Recyclingtechniken eine gute und umfangreiche Datengrundlage existiert. Zudem werden durch diese existierende Recyclinginfrastruktur hohe Recyclingquoten erzielt, die Deutschland zu einem der führenden Recyclingländer und damit zu einem *best-estimate Szenario* machen (EEB 2017). Für eine vollumfängliche Analyse müssen alle für ein Recycling relevanten Prozessschritte berücksichtigt werden. Die Untersuchung beginnt somit bei der Sammlung der sekundären Quellen und endet mit der metallurgischen Refinement zum reinen Metall; analog zum typischen Recyclingverfahren nach Abbildung 2.3.

Da die Untersuchungen auf realen Daten basieren, also den tatsächlich benötigten Energiebedarfen, Hilfs- und Betriebsstoffen etc. können nur Recyclingverfahren betrachtet werden, die im Industrie- oder Forschungsmaßstab existieren. Gibt es für das Recycling eines Metalls aus einer sekundären Quelle bis dato kein Recyclingverfahren, kann diese sekundäre Quelle also nicht in die Untersuchung mit einbezogen werden. Mögliche Erhöhungen der sekundärquellenspezifischen EoL-RQ sind ebenfalls nicht Bestandteil der Untersuchung. Um hierfür möglichst reale Daten generieren zu können, würden umfangreiche technische Modelle für jede spezifische sekundäre Quelle benötigt – siehe u. a. Reuter et al. (2018) und Reuter et al. (2015). Generische Ansätze wie sie u. a. von Gutowski et al. (2007), Gutowski (2011) oder Vidal (2018) vorgeschlagen sind, erfassen nur das theoretische Aufwandsminimum (Exergie bzw. Entropie) und vernachlässigen zahlreiche Faktoren wie technische Wirkungsgrade oder Materialverluste aufgrund von Prozessineffizienzen, die für die Erfassung realer Daten unabdingbar sind.

Die KEA des Metallrecyclings sind anhand von Modellen der Recyclingsysteme ermittelt. Die Modellierung erfolgt in der Software Umberto LCA+®. Die Recyclingsystemmodelle sind parametrisiert, um die Berechnung von Szenarien zu ermöglichen (Forschungsfrage (2)). Genauere Informationen hierzu können den nachfolgenden Abschnitten entnommen werden.

Ein weiteres, darauf aufbauendes Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung energetisch optimaler EoL-RQ der beispielhaften Metalle Kupfer, Tantal und Kobalt (Forschungsfrage (3)). Der dafür verwendete Optimierungsansatz basiert auf dem

Vergleich der KEA des Recyclings mit dem KEA der Primärproduktion. Um vollständige Vergleichbarkeit der beiden Produktionsmöglichkeiten zu gewährleisten, ist die Definition einer funktionellen Einheit¹ notwendig:

Bereitstellung 1 kg reines Metall (>99 %) aus sekundären bzw. primären Quellen.

Der Untersuchungsrahmen der Primärproduktion von Metallen setzt, analog zur sekundären Produktion, am frühestmöglichen Zeitpunkt an – der Gewinnung von Erzen aus Minen (primäre Quellen) und endet mit dem raffinierten Metall. Die Primärproduktion dominiert mengenmäßig die globale Metallproduktion und wird durch die weiterhin steigende Nachfrage an Metallen auch zukünftig noch eine wichtige Rolle spielen (van der Voet et al. 2019). Nationen, die keine eigenen bzw. ausreichenden Metallvorkommen im eigenen Land haben, beziehen die primären Metalle aus dem globalen primären Produktionssystem. Das zeigt beispielhaft die Kupferversorgung in Deutschland, die auf importierten Kupferkonzentraten aus zahlreichen Ländern basiert (Dorner et al. 2013b). Ändert sich nun die inländische Recyclingquote ist unklar, welche primären Quellen durch die Änderungen in der Bereitstellung von Sekundärmetall substituiert bzw. aus welchen vermehrt bezogen wird. Annäherungsweise wird daher der Untersuchungsrahmen der Primärproduktion global angesetzt und dessen KEA als globaler Durchschnitt erfasst. Weitere Ausführungen hierzu können Abschnitt 4.4.1 entnommen werden. Abbildung 4.1 fasst die wichtigsten Informationen dieses Abschnitts zusammen.

4.2 Modellbildung

In Kapitel 3 ist erläutert, dass der KEA der Indikator der Wahl ist, um das Rohstoffsystem primär sowie sekundärseitig zu bewerten und zu vergleichen. Die primäre Produktion zahlreicher Metalle ist weitestgehend über Ökobilanz-Datenbanken wie ecoinvent oder GaBi abgedeckt. Hier kann also auf eine umfangreiche Datenlage zurückgegriffen werden. Die sekundäre Produktion ist hingegen kaum erfasst und gestaltet sich als sehr komplex, da unterschiedlichste sekundäre Quellen, mit teils sehr unterschiedlichen Material- bzw. Metallkombinationen und -konzentrationen, als Inputs dienen (siehe hier auch Abschnitt 1.1.2 und Abbildung 3.3). Die unterschiedlichen sekundären Quellen benötigen teils

¹Die funktionelle Einheit gibt in der Ökobilanzierung den Nutzen des zu untersuchenden Systems an. Nähere Informationen können DIN 2009 entnommen werden.

	Primärgewinnung	Recycling
Räumlicher Bezug	global	deutschlandweit
Input	Erz in Minen	Sekundäre Quelle am Ort des Anfallens
Gewinnungsprozess	Fördern – Aufbereiten – Metallurgie	Sammeln – Aufbereiten – Metallurgie
Output	Reines Metall (>99%)	Reines Metall (>99%)
Funktionelle Einheit	Bereitstellung 1 kg reines Metall	

Abbildung 4.1 Untersuchungsrahmen und funktionelle Einheit der zu untersuchenden Systeme

unterschiedlichste Recyclingverfahren, die je nach sekundärer Quelle sehr komplex und umfangreich werden können. Über Datenbanken könnten zum einen nur Bruchteile des Gesamtsystems abgedeckt werden. Zum anderen wäre so keine Rechnung von Szenarien möglich. Es besteht somit die Notwendigkeit der Entwicklung entsprechender Modelle der Recyclingsysteme, die es ermöglichen, den KEA sowie auch weitere Umweltwirkungen (z. B. CO₂eq) der Sekundärgewinnung von Metallen differenziert zu erfassen. Die Modelle, die im Zuge der vorliegenden Arbeit erstellt sind, sind dabei so aufgebaut, dass sie für das Recycling eines Metalls aus den verfügbaren sekundären Quellen die Aufwände (in KEA oder CO₂eq) pro Masseneinheit recyceltes Metall ausgeben.

Die Modelle sind entsprechend der Zielsetzung der Arbeit jeweils auf das Recycling des spezifischen Beispielmetalls ausgerichtet. Prozesse, die das Recycling dieses Metalls nicht unterstützen, sind daher nicht modelliert. Die Modelle bestehen aus Foreground- und Backgroundprozessen. Erstere sind die Prozesse, die direkt am Recycling beteiligt sind. Das schließt u. a. Sammel- und Transportprozesse sowie alle Prozesse der manuellen, mechanischen und metallurgischen Aufbereitung ein. Diese Prozesse sind mit Primärdaten erstellt, deren Erhebung bzw. Simulation im nachfolgenden Abschnitt 4.3 erläutert ist. Als Backgroundprozesse werden alle Prozesse bezeichnet, die den Foregroundprozessen vorgeschaltet sind. Ein Beispiel hierfür ist die Stromerzeugung und alle ihr vorgelagerten Prozesse. Die entsprechende Datengrundlage ist der Datenbank ecoinvent entnommen.

Neben den reinen prozessspezifischen Daten der Foregroundprozesse, wie Energiebedarfe oder Massen an benötigten Hilfs- und Betriebsstoffen, sind noch weitere prozessspezifische Parameter notwendig, die für jeden Prozess j ($j = 1, 2, \dots, m$) und für jede sekundäre Quelle x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) differenziert ermittelt werden müssen:

- Inputkonzentrationen $\omega(x_i)_j$
- Konzentrationserhöhung $\eta(x_i)_j$
- Prozess- bzw. Recyclingeffizienzen $RE(x_i)_j$
- Allokationsfaktoren des Zielmetalls $A(x_i)_j$

Die Inputkonzentrationen $\omega(x_i)_j$ des Zielmetalls bestimmen entscheidend den notwendigen Durchsatz und damit auch den Aufwand der Prozesse, um eine Masseneinheit des Zielmetalls zu recyceln. Dieser Effekt ist bereits aus der primären Gewinnung von Metallen bekannt. Mit sinkendem Erzgehalt folgt der Aufwand für eine Masseneinheit gewonnenes Metall einem Potenzwachstum (Norgate und Jahanshahi 2010). Die Konzentrationserhöhung $\eta(x_i)_j$ des Zielmetalls, die durch einen Recyclingprozess j erzielt wird, bestimmt die Outputkonzentration, die wiederum die Inputkonzentration $\omega(x_i)_{j+1}$ des nachfolgenden Prozesses $j + 1$ ist:

$$\omega(x_i)_j \cdot \eta(x_i)_j = \omega(x_i)_{j+1} \quad (4.1)$$

Aufbereitungsprozesse die einer Aufkonzentration des Zielmetalls dienen – ob mechanisch (van Schaik et al. 2004) oder metallurgisch (Castro et al. 2004) – unterliegen grundsätzlich gewissen Ineffizienzen und damit Metallverlusten (siehe

auch Abschnitt 2.2). In den Modellen sind diese Metallverluste durch Recyclingeffizienzen $RE(x_i)_j$ der jeweiligen Prozesse j und sekundären Quellen x_i erfasst. Verluste des Zielmetalls führen dazu, dass größere Inputmengen benötigt werden, um eine Masseneinheit des Zielmetalls zu recyceln. Das bedeutet wiederum einen höheren Aufwand des spezifischen Prozesses pro Masseneinheit ausgebrachten Zielmetalls. Je später die Verluste in der Recyclingkette entstehen, d. h. je näher sie am recycelten Zielmetall anfallen, desto höher sind die Auswirkungen auf den Gesamtaufwand, da alle vorherigen Prozesse ebenfalls größere Inputmengen durchsetzen müssen. Die Metallverluste haben also in den vorherigen Prozessen bereits eine gewisse Wertschöpfung erfahren, die mit entsprechenden Aufwänden verbunden war. Diese Aufwände erhöhen den Gesamtaufwand, ohne den Output an recyceltem Metall zu erhöhen. Der Gesamtaufwand pro Masseneinheit recyceltes Metall wird also ebenfalls entsprechend erhöht. Hier gibt es entsprechende Analogien zur Methode der Materialflusskostenrechnung (DIN 2011).

Da das Recycling von sekundären Quellen jedoch meist nicht auf nur ein Zielmetall beschränkt ist, sondern das Recycling von mehreren Metallen bzw. Materialien ermöglicht, müssen die Aufwände entsprechend zugerechnet werden. Hierfür sind Allokationsfaktoren $A(x_i)_j$ für das Zielmetall notwendig. Um diese Allokationsfaktoren ermitteln zu können, müssen die oben angesprochenen Parameter nicht nur für das Zielmetall, sondern auch für alle weiteren Materialien bestimmt werden, die in den Prozessen recycelt werden, bzw. deren Recycling durch die Prozesse begünstigt wird. Wie diese Allokationsfaktoren gebildet werden, ist in Abschnitt 4.3.4 beschrieben.

Die reinen Prozessinputdaten (Energiebedarfe, Hilfs- und Betriebsstoffe) pro Masseneinheit Durchsatz sind nachfolgend als $KEA_D(x_i)_j$ zusammengefasst. Wie oben erläutert, skalieren die Parameter $\omega(x_i)_j$ und $RE(x_i)_j$ die $KEA_D(x_i)_j$ auf jeweils eine Masseneinheit des recycelten Zielmetalls. In Abbildung 4.2 sind die oben genannten Zusammenhänge und Funktionsweisen der Prozessparameter für ein Recyclingsystem mit $m = 2$ Prozessen veranschaulicht. Die resultierenden Gesamtaufwände der Prozesse pro Masseneinheit recyceltes Zielmetall am Ende der Recyclingkette (hier Output Prozess II) sind als $KEA_S(x_i)_j$ definiert.

Der Gesamtaufwand des Recyclings eines Zielmetalls aus einer sekundären Quelle x_i , nachfolgend als $KEA_S(x_i)$ definiert, ist die Summe der Aufwände aller m Prozesse. Im obigen Beispiel ist der Gesamtaufwand $KEA_S(x_i) = KEA_S(x_i)_I + KEA_S(x_i)_{II}$. Die allgemeine Definition ist wie folgt (Gleichung (4.2)):

Abbildung 4.2 Parametrisiertes Recyclingverfahren mit 2 Prozessen

$$KEA_S(x_i) = \sum_{j=1}^m \frac{KEA_D(x_i)_j}{\omega(x_i)_j \cdot \prod_{j=1}^m RE(x_i)_j} \cdot A(x_i)_j \quad (4.2)$$

4.3 Vorgehen der Datenermittlung

Um umfassende metallspezifische Recyclingmodelle bilden zu können, ist eine umfangreiche Datengrundlage notwendig, die alle erforderlichen Prozesse abdeckt. Die Wegstrecken der Sammel- und Transportlogistik sind über Simulationen ermittelt. Die Erläuterung hierzu ist in Abschnitt 4.3.1 gegeben. Abschnitt 4.3.2 beinhaltet Informationen über die Ermittlung der Prozessparameter und prozessspezifischen Inputs (Energiebedarfe, Hilfs- und Betriebsstoffe) der mechanischen und metallurgischen Aufbereitungsprozesse. Der Umgang mit eventuellen Datenunsicherheiten und der Allokationsproblematik ist in den Abschnitten 4.3.3 und 4.3.4 behandelt. Für die Ermittlung der energetisch optimalen EoL-RQ sind zudem Massenbilanzen notwendig, die Auskunft darüber geben, welche Massen eines Metalls in welchen sekundären Quellen zur Verfügung stehen und welche Anteile daraus rückgewonnen werden können. Informationen über das Vorgehen der Ermittlung der Massenbilanzen sind im Abschnitt 4.3.5 enthalten.

4.3.1 Datenerhebung der Transportdistanzen und Sammellogistik

Die Sammellogistik der verschiedenen sekundären Quellen und die weiterführenden Transporte der aufbereiteten Metallfraktionen und EoL-Produktkomponenten erfolgt im Wesentlichen nach den in Abbildung 4.3 aufgeführten Schritten – der Sammlung in einem Einzugsgebiet, den Transporten zu den nächstgelegenen manuellen und mechanischen Weiterbehandlungs- bzw. Aufbereitungsanlagen und dem Transport zur metallurgischen Aufbereitung. Die Anzahl der beteiligten Akteure nimmt dabei immer weiter ab (siehe auch Abbildung 2.3). Dieses Transportschema kann je nach Metall und sekundärer Quelle variieren. Darauf ist in den jeweiligen Unterkapiteln untersuchten Metalle explizit eingegangen. Als Datengrundlage dienen reale Adressen der Sammel- und Aufbereitungsstellen, die in den meisten Fällen bereits gesammelt über entsprechende Organisationen zur Verfügung gestellt sind. Fehlende Adressdaten und Informationen sind durch Umfragen, Online-Recherchen oder entsprechende Literatur ermittelt.

Abbildung 4.3 Typische Abfolge der Sammel- und Transportlogistik des Metallrecyclings

Die Simulationen der jeweiligen Transportdistanzen sind anhand der Software ArcGIS Desktop bzw. dessen Produktkomponente ArcMap des Herstellers ESRI® durchgeführt. Dieses Programm ermöglicht komplexe räumliche Auswertungen georeferenzierter Daten. Im Folgenden ist das methodische Vorgehen der Simulation der Transportdistanzen der in Abbildung 4.3 aufgeführten Transporte erläutert.

Es ist die grundsätzliche Annahme getroffen, dass die räumliche Verteilung der sekundären Quellen mit der Einwohnerzahl (EWZ) korreliert.² D. h. je größer die Anzahl an Einwohnern einer bestimmten Region, desto größere Massen

²Diese Annahme ist dadurch begründet, dass alle ehemaligen Produkte bzw. sekundäre Quellen unmittelbar mit menschlichem Handeln zusammenhängen. Je mehr Einwohner, desto mehr Autos, Elektrogeräte und Siedlungsabfälle. Ebenso ist die Infrastruktur – wie Bebauung und Stromversorgung – in dicht besiedelten Gebieten stärker ausgeprägt.

an sekundären Quellen fallen in diesem Bereich an. Über diesen Zusammenhang kann ein Gewichtungsfaktor (GF) abgeleitet werden. Dieser GF ist notwendig, um die Transportdistanzen, die zurückgelegt werden müssen und von Region zu Region unterschiedlich ausfallen, entsprechend ihres tatsächlichen Aufkommens an sekundären Quellen zu gewichten. So können die für Deutschland durchschnittlichen Transportdistanzen, der in Abbildung 4.3 dargestellten typischen Verfahrensschritte, ermittelt werden. Ein Beispiel zur Veranschaulichung: Gäbe es nur eine Sammelstelle für Elektroaltgeräte in ganz Deutschland, so müsste aus allen Regionen diese eine Sammelstelle angefahren werden. Die unterschiedlichsten Transportdistanzen der Regionen nun gleichgewichtet für eine Mittelwertbildung zu nutzen, um eine für Deutschland durchschnittliche Transportdistanz zu bestimmen, wäre sehr ungenau. Denn die Aufkommen sind von Region zu Region unterschiedlich, d. h. das unterschiedliche Mengen transportiert werden müssen, was der oben erläuterten Gewichtung bedarf.

Anhand des ersten Transportprozesses – der Sammlung – ist eine Gewichtung über die EWZ auf Kreisebene vorgenommen. Diese ist die kleinstmögliche räumliche Einteilung, für die ausreichende Daten zur Verfügung stehen und Deutschland vollumfänglich erfasst. Abbildung 4.4 zeigt die Einteilung nach Kreisebenen sowie die entsprechenden Einwohnerzahlen. An diesem Punkt ist unterstellt, dass die Sammlung der sekundären Quellen immer bei der nächstgelegenen Sammelstelle erfolgt. Jede Sammelstelle hat also ein Einzugsgebiet, aus dem die sekundären Quellen angeliefert werden. Für jedes Einzugsgebiet kann eine durchschnittliche Transportdistanz errechnet werden. Die durchschnittlichen Transportdistanzen müssen entsprechend gewichtet werden, was über die EWZ des Kreisgebietes vorgenommen ist, in dem die Sammelstelle liegt. Befindet sich nur eine Sammelstelle in einem Kreisgebiet a (mit $a = 1, 2, \dots, h$), so entspricht die EWZ des Kreisgebietes dividiert durch die EWZ Deutschlands dem GF. Sind mehrere Sammelstellen in einem Kreisgebiet a vorhanden, so muss zudem durch die Anzahl der Sammelstellen im Kreisgebiet a geteilt werden, um den GF der einzelnen Sammelstellen des Kreises a zu erhalten. Siehe hierzu auch Gleichung (4.3). Dass in einem Kreisgebiet keine Sammelstelle lokalisiert ist und damit nicht in die Betrachtung miteingeht, kann nahezu ausgeschlossen werden, da in Deutschland knapp 300 Kreise aber für die meisten sekundären Quellen, die in eine dezentrale Sammlung gehen, weit über 5.000 Sammelstellen existieren.

$$GF_{\text{Sammelstelle in Kreis } a} = \frac{EWZ_{\text{Kreis } a}}{EWZ_{\text{Deutschland}} \cdot \text{AnzahlSammelstellen}_{\text{in Kreis } a}} \quad (4.3)$$

Abbildung 4.4 Einwohnerzahlen auf Kreisebene der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2014

Dieser Ansatz geht also annäherungsweise von einer gleichen Aufteilung der sekundären Quellen auf die verschiedenen Sammelstellen innerhalb eines Kreisgebiets a (mit $a = 1, 2, \dots, h$) aus. Durch Gleichung (4.3) sind Mehrfachzählungen der EWZ ausgeschlossen, sodass Gleichung (4.4) gilt:

$$\sum_{a=1}^h (GF_{\text{Sammelstelle Kreis } a} \cdot \text{Anzahl Sammelstelle}_{\text{in Kreis } a}) = 1 \quad (4.4)$$

Die GF der Sammlung sind mit Gleichung (4.3) eindeutig definiert. Alle weiteren Transporte, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, benötigen ebenfalls GF. Hier muss berücksichtigt werden, dass die Aufbereitungsanlagen aus verschiedenen Sammelstellen beliefert werden. Dasselbe gilt auch für alle weiteren Transporte. Somit müssen die jeweiligen GF der beteiligten Vortransporte aufsummiert werden, um einen neuen GF zu erhalten. Hierfür ist der oben hergeleitete GF der Sammelstellen als GF I und damit als Ausgangsbasis für alle weiteren GF definiert. Die darauffolgenden GF sind jeweils als GF II bzw. III etc. bezeichnet. Abbildung 4.5 veranschaulicht beispielhaft wie sich die angepassten GF zusammensetzen. Die Punkte stellen dabei Sammel- bzw. Aufbereitungsanlagen dar, die Pfeile die entsprechenden Transportwege.

Abbildung 4.5 Beispiel zur Bestimmung der GF II und III

Um die durchschnittliche Transportdistanz der Sammlung einer sekundären Quelle zu ermitteln, ist, wie oben bereits erwähnt, für jede reale Sammelstelle ein Einzugsgebiet bestimmt. In diesem Einzugsgebiet ist die Sammelstelle die

nächstgelegene für jeden darin enthaltenen Punkt. Es handelt sich also um optimale Einzugsgebiete. Abbildung 4.6 zeigt beispielhaft die Methode der optimalen Einzugsgebiete, die im mathematischen Sinne sogenannte Thiessen-Polygone darstellen.

Abbildung 4.6 Beispiel für optimale Einzugsgebiete im Sinne von Thiessen Polygonen

Um die durchschnittliche Distanz aller Punkte in einem Polygon zur entsprechenden Sammelstelle zu bestimmen, können die ArcMap Werkzeuge *Euklidische Allokation* und *Euklidische Abstände* verwendet werden. Über die Gewichtung mit den GF I der resultierenden Distanzen kann dann die durchschnittliche Distanz bestimmt werden, die in Deutschland zurückgelegt werden muss, um eine bestimmte sekundäre Quelle zur nächstgelegenen Sammelstelle zu transportieren.

Die Transportstrecken, die von den Sammelstellen zu den weiterführenden Aufbereitungsanlagen zurückgelegt werden, sind über das ArcMap Werkzeug *Near* bestimmt. Dadurch ist für jede Sammelstelle die nächstgelegene Weiterbehandlungsanlage ermittelt und die Transportdistanz bestimmt. Auch hier sind also wieder die kleinstmöglichen Transportdistanzen angenommen. Die Gewichtung dieser Transportdistanzen erfolgt ebenfalls über die GF I, da noch keine Kumulation der sekundären Quellen aus den unterschiedlichen Einzugsgebieten stattgefunden hat. Das gleiche Verfahren ist auch für die Distanzbestimmung

der ersten Weiterbehandlungsanlage zu einer weiteren anwendbar. In diesem Fall müssen die GF II verwendet werden, um die durchschnittliche Distanz zu bestimmen. Der finale Transport der aufbereiteten Metallfraktionen von der letzten Weiterbehandlungsanlage zur Metallurgie kann in ArcMap ebenfalls über das Werkzeug *Near* bei mehreren Standorten, bzw. das Werkzeug *Point Distance* bei einem Standort durchgeführt werden. Auch hier erfolgt wieder eine gewichtete Mittelwertbildung mit den GF III (bzw. GF II sollte es keine zweite Weiterbehandlungsanlage geben). Die oben beschriebene gewichtete Mittelwertbildung ist in Gleichung (4.5) allgemeingültig formuliert. Dabei ist $\overline{D}_u$ das gewichtete arithmetische Mittel aller w Distanzen (mit $t = 1, 2, \dots, w$) eines Transportprozesses u .

$$\overline{D}_u = \sum_{t=1}^w D_t^u \cdot G F_t^u \quad (4.5)$$

$\overline{D}_u$: Gewichtetes arithmetisches Mittel der Distanzen eines Transportprozesses u

D_t^u : Distanz t des Transportprozesses u , mit $t=1,2,\dots,w$

$G F_t^u$: Gewichtungsfaktor der Distanz t des Transportprozesses u

Das beschriebene Verfahren der Simulation der Transportdistanzen mit dem Softwareprogramm ArcMap weist einige Unsicherheiten auf, die nachfolgend diskutiert werden. So ermittelt die Methode immer die kleinstmöglichen Transportdistanzen, d. h. die Distanzen, die mindesten zurückgelegt werden müssen, um die Metalle aus den sekundären Quellen zu recyceln. In der Realität sind die Transportwege jedoch deutlich komplexer. So ist z. B. die Verfahrenskette aus Abbildung 4.3 häufig durch zahlreiche Zwischenhändler gekennzeichnet, die Schrotte und aufbereitete Metallfraktionen in Abhängigkeit des aktuellen Weltmarktpreises kaufen oder verkaufen (Langner 2011). Zudem handeln die Aufbereitungsbetriebe die aufbereiteten Metallfraktionen nicht nach räumlichen Distanzen, sondern nach dem besten ökonomischen Angebot (Electrocycling GmbH 2017b). Ebenso ist davon auszugehen, dass die Annahme, Endkonsumenten würden bei der Entsorgung bzw. Sammlung der EoL-Produkte, wie z. B. Elektroaltgeräten, die nächstgelegene Sammelstelle anfahren und so die kürzeste Distanz wählen, nicht immer der Realität entspricht. Eine realitätsnähere Erfassung der Transportdistanzen müsste zahlreiche soziale und ökonomische Faktoren mitberücksichtigen und wäre daher nur unter enormem Aufwand möglich. Die vorgestellte Methode der optimalen Transportdistanzen kann für alle sekundären Quellen unter vertretbarem Aufwand einheitlich angewandt werden und

ermöglicht eine annäherungsweise Abbildung der in der Realität stattfindenden Transportdistanzen.

Die verwendeten Werkzeuge des Softwareprogrammes ArcMap errechnen lediglich die direkte Distanz bzw. die Luftlinie zwischen den einzelnen Punkten. Um diese Unschärfe aus den Daten zu eliminieren, ist ein Korrekturfaktor (KF) eingeführt, der über einen stichprobenartigen Vergleich der Luftliniendistanzen mit den tatsächlichen Straßenrouten ermittelt ist. Der KF beträgt 1,3018³.

Neben den Transportdistanzen (in km), die zurückgelegt werden müssen, muss zudem bekannt sein, welche Massen über diese Distanzen transportiert werden, welche Transportmittel dafür verwendet werden und welche Auslastung der Transportkapazitäten erzielt werden. Die Massen, die gesammelt und transportiert werden müssen, um eine Masseneinheit des Zielmetalls zu recyceln, berechnen sich dabei ähnlich zur in Abschnitt 4.2 beschriebenen Berechnungsmethode der Recyclingmodelle. Die Massen entsprechen dem reziproken Wert der Inputkonzentrationen, dividiert durch die Recyclingeffizienzen aller nachfolgenden Prozesse. Bei Sammlungen und Transporten, die durch Unternehmen vorgenommen werden, sind Lastkraftwagen (LKW) als Transportmittel angenommen. Da jedes Unternehmen nach der Maxime der Gewinnmaximierung operiert, kann davon ausgegangen werden, dass die Transportkapazitäten immer weitestgehend ausgelastet sind. Im Falle der Sammlung durch Endkonsumenten, also Privatpersonen, ist die Sammlung mit Personenkraftwagen (PKW) angenommen. Ein typisches Beispiel ist hier die Sammlung von Elektroaltgeräten. Die Auslastungen der Transportkapazitäten, die dabei erzielt werden, können nur schwer abgeschätzt werden, da sie vom Individualverhalten der Privatpersonen abhängen. Hinzu kommt, dass weitere Nutzen der zurückgelegten Wegstrecke existieren können, die Allokationen der Aufwände notwendig machen würden. Typische Beispiele sind z. B. Erledigungen wie Einkäufe, die durch die Privatperson im Zuge der zurückzulegenden Wegstrecke der Sammlung getätigt werden. Um zu diesen möglichen weiteren Nutzen und den Auslastungen der Transportkapazitäten belastbare Aussagen treffen zu können, müssten umfangreich angelegte Umfragen vorgenommen werden, die den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen würden. Es sind daher vereinfachend eine vollständige Auslastung der Kapazitäten und keine zusätzlichen Nutzen angenommen. Diese Annahmen sind darin begründet, dass die Effizienzgewinne der vollständigen Auslastung – die in der Praxis vermutlich nicht erreicht wird – die Allokationseffekte der möglichen zusätzlichen Nutzen aufwiegen.

³Luftliniendistanz $\times$ 1,3018 = Straßenroutendistanz

4.3.2 Datenerhebung der mechanischen und metallurgischen Aufbereitung

Die Prozessdaten der manuellen, mechanischen und metallurgischen Aufbereitung umfassen die Recyclingeffizienzen $RE(x_i)_j$, die Eingangskonzentrationen $\omega(x_i)_j$, die Konzentrationserhöhungen $\eta(x_i)_j$ sowie alle Energie-, Hilfs- und Betriebsstoffe ($KEAD(x_i)_j$). Die Daten sind – sofern möglich – über direkte Kooperationen mit Aufbereitungsunternehmen, wie z. B. Electrocyling GmbH, Aurubis AG, Cablo GmbH oder H.C. Starck GmbH, erfasst. Daten, die nicht aus der betrieblichen Praxis erhoben werden können, sind aus der entsprechenden Fachliteratur entnommen. In wenigen Ausnahmefällen, in denen keine Prozessdaten in der Literatur oder über betriebsinterne Abschätzungen verfügbar sind, ist auf theoretische Ansätze, wie stöchiometrische Berechnungen bei metallurgischen Verfahren oder das Bonds Law, um Zerkleinerungsaufwände zu erfassen, zurückgegriffen. Wird ein Metall bis dato nicht (in industriellem Umfang) aus einer sekundären Quelle recycelt, so ist auf Anlagentechniken im Forschungs- und Pilotmaßstab zurückgegriffen. Stehen mehrere Aufbereitungsverfahren zur Verfügung, so ist die mit den besten Prozessdaten angenommen. Die Datenerhebung und -kalkulationen sind metall-, prozess- und sekundärquellenspezifisch in Appendix II des elektronischen Zusatzmaterials dokumentiert.

Entsprechend der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Funktionsweise der Modelle, sind die Prozessdaten pro Masseneinheit Durchsatz bzw. Input erfasst. Die Skalierung auf eine Masseneinheit Sekundärmetall erfolgt anhand der Modelle.

4.3.3 Umgang mit Datenunsicherheiten

Selbst bei etablierten Prozessen ist die Datenlage nicht immer eindeutig. So kann es durchaus vorkommen, dass unterschiedliche Quellen auf unterschiedliche Prozessdaten verweisen. Weisen die unterschiedlichen Werte eine akzeptable Varianz auf, so ist ein arithmetischer Mittelwert berechnet. Liegen die Werte unverhältnismäßig weit auseinander, ist eine fundierte Auswahl getroffen. Nähere Informationen sind der Datendokumentation in Appendix II des elektronischen Zusatzmaterials zu entnehmen.

In Fällen, in denen bis dato kein Recycling in der Praxis stattfindet, aber Abschätzungen der Prozessdaten über entsprechende Technologien im Pilot- bzw. Forschungsmaßstab vorgenommen werden können, existieren ebenfalls Datenunsicherheiten. Diese sind auf die zu erwartenden Unterschiede der Prozessdaten von Anlagen im Pilot- bzw. Forschungsmaßstab und industriellen

Anlagen zurückzuführen. In der Literatur finden sich zwar Ansätze und Beispiele für die Extrapolation der Daten vom Labor- bzw. Forschungsmaßstab auf den Industriemaßstab (Kupfer 2005) und vom Pilotmaßstab auf den Industriemaßstab (Shibasaki 2009). Um dabei valide Daten zu generieren, sind jedoch umfangreiche Informationen über die Auslegung, die räumliche Lage etc. der industriellen Umsetzung notwendig. Diese Informationen sind in den entsprechenden Fällen, in denen kein Recycling stattfindet, nicht vorhanden. Damit kann auch keine sinnvolle Extrapolation der Daten des Forschungs- bzw. Pilotmaßstabes auf den industriellen Maßstab vorgenommen werden. Da jedoch in den Fällen, in denen kein Recycling praktiziert wird, auch meist die verfügbaren Mengen des zu recycelnden Metalls gering sind (Graedel et al. 2011), kann davon ausgegangen werden, dass kein gravierender Unterschied in der Größenordnung zwischen Pilotmaßstab und industriellem Maßstab existiert. Die Daten der Pilot- bzw. Forschungsanlagen können somit annäherungsweise verwendet werden.

Findet kein Recycling eines Metalls aus einer sekundären Quelle statt, existieren auch keine Informationen über die Transportlogistik. Um diese Datenlücken zu schließen, sind Szenarien erstellt, die die wahrscheinlichsten Möglichkeiten erfassen. Anhand dieser Szenarien können nicht nur die Aufwände abgeschätzt, sondern zudem auch Aussagen darüber getroffen werden, wie das Recycling und die damit verbundene Transportlogistik bei einer industriellen und großflächigen Umsetzung konzeptioniert sein sollte.

4.3.4 Allokationsproblematik

Sollen die Aufwände eines Prozesses bzw. einer Handlung, die mehrere Nutzen erfüllt, diesen Nutzen anteilig zugerechnet werden, so spricht man von einem Allokationsproblem. So wie Metalle in primären und sekundären Quellen meist in Kombination mit anderen Metallen vorkommen, findet auch die Gewinnung eines Metalls im Grunde nie vollständig isoliert statt, sondern meist in Verbindung mit der Gewinnung weiterer Metalle und Materialien (siehe auch Abschnitt 1.1.2 und 2.2). Prozesse der Metallgewinnung sind deshalb meist Multifunktionsprozesse d. h. Prozesse mit mehreren Nutzen bzw. Produkten. Die Recyclingmodelle, die in dieser Arbeit erstellt sind, unterliegen also Allokationsproblemen.

In der Ökobilanzierung können sich Allokationen entscheidend auf die Ergebnisse auswirken und sorgen somit für gewisse Unsicherheiten (van der Voet et al. 2010; Liu und Müller 2012). Die Wahl der Allokationsmethode ist von entscheidender Bedeutung und muss fundiert und transparent stattfinden. Zwar geben die ISO Normen 14040/44 der Ökobilanzierung eine Reihenfolge für die

Wahl der Allokationsmethoden vor – (1) Vermeiden der Allokation (durch Systemdisaggregation oder Systemerweiterung), (2) physikalische Allokation und (3) ökonomische Allokation – verweisen aber gleichzeitig auf die Möglichkeit, dass mehrere Allokationsmethoden zulässig sein könnten (DIN 2018). Das zeigt sich auch in der praktischen Anwendung (Pelletier et al. 2015). Die Wahl der Allokationsmethode unterliegt damit dem Modellierer und dessen Argumentation.

Ein Vermeiden der Allokationen, wie es die ISO 14044 vorgeschlägt, ist bei Metallgewinnungsprozessen nicht möglich. Zum einen ist der Inputstrom für alle aus einer sekundären oder primären Quelle gewonnenen Metalle gleich, was in der Regel eine Vermeidung durch Disaggregation der Prozesse nicht zulässt (Tuusjärvi et al. 2012). Zum anderen ist eine Vermeidung der Allokationen durch Systemerweiterungen – insbesondere bei solchen komplexen Metallgewinnungsprozessen mit zahlreichen Kuppelprodukten – stark eingeschränkt (Ekvall und Finnveden 2001; Heijungs und Guinée 2007). Zudem müssten für Systemerweiterungen Metallgewinnungsprozesse existieren, die keiner Allokation bedürfen, also keinen Multifunktionsprozessen entstammen. Wie oben bereits erwähnt, gibt es im Grunde keine vollkommen isolierte Gewinnung von Metallen, was diese Option der Systemerweiterung nicht anwendbar macht. Allokationen sind folglich bei der Ermittlung der Aufwände der Gewinnung von einzelnen Metallen unumgänglich.

Zahlreiche Publikationen verweisen auf die Schwierigkeiten der Wahl der Allokationsmethode bei der sekundären (Valero Navazo et al. 2014; Bigum et al. 2012) und primären Metallgewinnung (Sun et al. 2017; Santero und Hendry 2016; Stamp et al. 2013; Tuusjärvi et al. 2012). Neben den beiden in der Ökobilanzierung gängigen Methoden der Preis- und Massenallokation (DIN 2018, 2009) lassen sich in der Literatur noch weitere spezifische Allokationsmethoden für die Metallgewinnung finden. Valero et al. (2015) schlagen eine Allokation nach den Exergiewerten der Metalle in den Erzen vor, also die Exergie, die die Erde aufgewandt hat, um die Konzentration in den Minen zu erreichen und damit auch die Exergie, die der Mensch aufwenden müsste, um die natürlichen Minen zu reproduzieren. Die Idee dahinter ist, einen auf physikalischen Grundlagen basierenden Allokationsfaktor zu bekommen, der die Knappheit⁴ eines Metalls miteinbezieht. Valero et al. (2015) kommen allerdings auch zu dem Ergebnis, dass die errechneten Exergiewerte stark mit den Metallpreisen korrelieren. Das ist darauf zurückzuführen, dass bei der Berechnung der Exergiewerte die Metallkonzentrationen in den Minen von entscheidender Bedeutung sind und diese wiederum eine

⁴Gemessen am Konzentrationsverhältnis der Mine zur Referenzsubstanz, letztere ist die durchschnittliche Erdkruste, auch Thanatia genannt.

hohe Korrelation mit den Metallpreisen aufweisen (Johnson et al. 2007; Tuusjärvi et al. 2012). Zudem ist dieser Ansatz bis dato nur für die primäre Metallgewinnung ausgelegt, in der vorliegenden Arbeit ist jedoch die sekundäre Gewinnung zu allozieren.

Zahlreiche weitere Studien, die Metallgewinnungsprozesse analysieren, verwenden ebenfalls Allokationsmethoden, die auf physikalischen Werten wie Masse, Energie oder Exergie basieren (Domínguez et al. 2013; Eckelman 2010; Yellishetty et al. 2009; Swart et al. 2014). Sun et al. (2017) kritisieren diese Allokationsmethoden dahingehend, dass die zugrundeliegenden physikalischen Beziehungen der In- und Outputs nicht ausreichend im Sinne der ISO 14044 analysiert wurden. Sie schlagen eine Methode vor, die Allokationen der Energieinputs der Prozesse nach deren tatsächlichen Bedarf vornimmt und somit einen klaren physikalischen Zusammenhang zwischen In- und Outputs gewährleistet. Diese Allokationsmethode ist jedoch im Grunde nur bei pyrometallurgischen Prozessen von Vorteil, da hier über die spezifischen Wärmekapazitäten der Metalle deren tatsächliche Energiebedarfe errechnet werden können. Bei Prozessen des Bergbaus und der Zerkleinerung (primären Gewinnung), wie auch beim Transport oder der mechanischen Aufbereitung (sekundären Gewinnung), resultiert die Methode von Sun et al. (2017) in einer einfachen Massenallokation. Grundsätzlich muss bei einer Allokation nach physikalischen Werten die Frage gestellt werden, ob eine solche Zuteilung – auch wenn sie die realen physikalischen Gegebenheiten widerspiegelt – die „richtige“ bzw. „gerechte“ ist.

Um zu erklären, warum eine Massenallokation bzw. eine Allokation nach physikalischen Grundlagen in den meisten Fällen der Metallproduktion keine gerechte Zuteilung ist, ist das Beispiel einer fiktiven Goldmine herangezogen. Aus dieser Mine können nur zwei Stoffe gefördert werden – Gold und Gestein. Letzteres wird für den Straßenbau und ähnliche Einsatzgebiete verwendet. Die tatsächlichen Massen, die bewegt werden, bestehen zu deutlich über 99 % aus einfachem Gestein. Gold hat dabei lediglich einen Anteil im niedrigen ppm Bereich. Der ökonomische Anreiz eine solche Mine zu betreiben, ist dennoch auf das Gold zurückzuführen. Wäre kein Gold in dieser Mine, würde auch das Gestein nicht gefördert werden. Wäre es gerecht, obwohl diese Mine hauptsächlich aus Gründen des Goldes betrieben wird, fast alle Aufwände dem Gestein zuzurechnen? Vielmehr erscheint eine Zurechnung nach den ökonomischen Werten (Marktpreisen) der beiden Stoffe, also den Werten, die auch die Aufwände der Gewinnung rechtfertigen, gerecht. Dieser Argumentationslogik folgen auch die zwei führenden ökobilanziellen Datenbanken ecoinvent und GaBi und wenden Allokationen nach Marktpreisen an (Classen et al. 2009; Kupfer et al. 2019).

Dieselbe Logik gilt auch für die Allokation der sekundären Metallgewinnung. Bigum et al. (2012) argumentieren, dass für Recycling, sofern es aus dem Blickwinkel der Gewinnung von Rohstoffen gesehen wird, eine Allokation nach den Marktpreisen vorgenommen werden sollte, da eben genau diese den Anreiz der Gewinnungsprozesse darstellen. Denn Recycling wird, ebenso wie Bergbau, nur dann praktiziert, wenn es einen ökonomischen Mehrwert bietet. Das bestätigen auch andere Untersuchungen (Johnson et al. 2007; Dahmus und Gutowski 2007). Bigum et al. (2012) verweisen zudem darauf, dass Recycling auch aus dem Gesichtspunkt der Entsorgung ausgedienter Produkte gesehen werden kann, also als Maßnahme der Abfallbeseitigung. In diesem Fall ist die Allokation nach Masse bzw. nach den realen physikalischen Gegebenheiten die Methode der Wahl.

Der Argumentation von Bigum et al. (2012) folgend, sind in dieser Arbeit alle Prozesse der Recyclingkette, die unmittelbar der Gewinnung von Metallen bzw. Materialien dienen, also einem ökonomischen Anreiz unterliegen, nach Marktpreisen alloziert.⁵ Das betrifft alle Prozesse, mit Ausnahme der Sammlung, die, sofern sie als Entsorgungsmaßnahme verstanden werden kann, nach der Masse der Produkte alloziert ist. Die Sammlung ist dann als eine Entsorgungsmaßnahme zu bewerten, wenn sie von einem Akteur vorgenommen wird, der keinen ökonomischen Anreiz verfolgt, sondern sich nur der ausgedienten Produkte bzw. Abfälle entledigen will. Ein typisches Beispiel hierfür ist der Transport von Elektroaltgeräten durch den Endkonsumenten zur Sammelstelle. Grundsätzlich sind die jeweiligen Prozesse der Recyclingmodelle, der Empfehlung von Ekvall und Finnveden (2001) folgend, soweit disaggregiert, dass Allokationen, wo immer möglich, vermieden sind.

Ein wesentlicher Kritikpunkt der ökonomischen Allokation nach Marktpreisen, der immer wieder angeführt wird (siehe u. a. Valero et al. 2015), ist die teils hohe Volatilität der Marktpreise. Diese Unsicherheit wird typischerweise über eine Mittelwertbildung über mehrere Jahre behoben. Für die Recyclingmodelle dieser Arbeit sind die Marktpreise der Metalle über fünf Jahre (2013–2017) gemittelt.

4.3.5 Ermittlung der Massenbilanzen

Die EoL-RQ eines Metalls schließt alle verfügbaren bzw. anfallenden sekundären Quellen in einem definierten Untersuchungsrahmen und -zeitraum ein. Eine

⁵Die Aufwände der Transportprozesse (außer Sammlung) sind mit den gleichen Allokationsfaktoren, wie der nachgelagerte Aufbereitungsprozess alloziert. Denn für diesen nachgelagerten Prozess wird der Transport vorgenommen.

EoL-RQ eines Metalls von 100 % entspricht der Summe aller Massen dieses Metalls in seinen sekundären Quellen, die im definierten Untersuchungsrahmen und -zeitraum für ein potenzielles Recycling zu Verfügung stehen. Zu welchen Anteilen das Recycling aus den jeweiligen sekundären Quellen zur EoL-RQ eines Metalls theoretisch beitragen könnte, ist folglich anhand der verfügbaren Massen bestimmt. Zu welchen Anteilen das Recycling aus den jeweiligen sekundären Quellen zur tatsächlichen EoL-RQ beiträgt, ist demnach durch die Metallmassen bestimmt, die auch tatsächlich recycelt werden. Um diese Größen zu ermitteln müssen zusätzlich die Verluste durch unzureichende Sammlung (Sammelquoten $SQ(x_i)$) und prozessspezifische Aufbereitung (Recyclingeffizienzen $RE(x_i)_j$) berücksichtigt werden. Die Sammelquote $SQ(x_i)$ gibt an, welcher Anteil der verfügbaren Massen der sekundären Quellen tatsächlich gesammelt wird. Die Recyclingeffizienz $RE(x_i)_j$ bestimmt den Anteil des Inputs in einen Recyclingprozess, der funktionell recycelt wird.

Für einige ausgewählte Metalle wurden bereits solche Massenbilanzen für unterschiedlichste Regionen publiziert. So gibt es zahlreiche globale und kontinentale Analysen für u. a. Kupfer (Ruhrberg 2006; Bertram et al. 2002; Glöser et al. 2013), Eisen und Stahl (Pauliuk et al. 2013; Wang et al. 2007), Zink (Gradel et al. 2005), Silber (Johnson et al. 2005), Kobalt (Harper et al. 2012) und Nickel (Reck et al. 2008). Einige Analysen sind auch auf nationaler Ebene verfügbar (Daigo et al. 2009; Bertram et al. 2003; Tanimoto et al. 2010). Diese sind aber teils stark veraltet, meist sehr unspezifisch und zudem für nur wenige Metalle für den Untersuchungsrahmen Deutschland verfügbar. Zudem erfassen diese Massenbilanzen Recycling nur dann, wenn es auch tatsächlich praktiziert wird. Um die energetisch optimalen EoL-RQ zu ermitteln, sollen allerdings auch sekundäre Quellen berücksichtigt werden, die bis dato nicht recycelt werden, deren Recycling allerdings technisch möglich wäre. Es besteht somit die Notwendigkeit, die Massenbilanzen selbst zu erstellen.

Die Ermittlung der Massen der sekundären Quellen der oben zitierten Studien basieren in der Regel auf dem sogenannten *Lifetime-Approach*. Dieser Ansatz unterliegt der Annahme, dass die Lebensdauern von Produkten über Verteilungsfunktionen beschrieben werden können. Über diese Verteilungsfunktionen wird ermittelt, in welchem Jahr welche Mengen der sich in der Nutzung befindlichen Produkte als EoL-Produkte bzw. sekundäre Quellen anfallen. Der Vorteil dieses Lifetime-Approachs liegt im Wesentlichen darin, dass so Daten der anfallenden sekundären Quellen über mehrere Jahre abgeschätzt werden können. Das ist insbesondere dann hilfreich, wenn keine statistischen Daten über die anfallenden sekundären Quellen zur Verfügung stehen oder Aussagen über deren zukünftige Entwicklungen getroffen werden sollen. Ein wesentlicher Nachteil ist

dabei, dass es sich um eine modellhafte Annäherung handelt, die mit gewissen Unsicherheiten verbunden ist. So ist u. a. nicht bekannt welche Verteilungsfunktion am besten geeignet ist, um zu ermitteln, wann die sekundären Quellen anfallen (siehe u. a. Glöser et al. 2013). In dieser Arbeit sind die Massen der anfallenden sekundären Quellen anhand aktueller statistischer Erhebungen (u. a. des statistischen Bundesamtes) ermittelt. Auch die Sammelquoten $SQ(x_i)$ sind weitestgehend statistischen Erhebungen und teils Abschätzungen aus der Literatur entnommen. Die Recyclingeffizienzen $RE(x_i)_j$ entsprechen den aktuell eingesetzten Technologien und sind entweder direkt über Unternehmenskontakte ermittelt oder aus entsprechenden Fachveröffentlichungen entnommen (siehe hierzu auch Abschnitt 4.3.2).

4.4 Optimierungsmethode

Um die Forschungsfrage (3) der vorliegenden Arbeit – bis zu welcher EoL-RQ ein Metall recycelt werden sollte – zu beantworten, müssen die Recyclingaufwände, die mithilfe der Recyclingmodelle ermittelt sind, entsprechend ausgewertet werden. Hierfür ist eine Optimierungsmethode angewandt, die auf dem Vergleich der KEA der primären und sekundären Metallgewinnung basiert. Die grundsätzlichen Überlegungen dieser Methode sowie eine detaillierte Beschreibung der mathematischen Grundlagen kann den Abschnitten 4.4.1 und 4.4.2 entnommen werden.

4.4.1 Beschreibung der Methode und kritische Betrachtung

Um herauszufinden, ob das Recycling eines Metalls aus einer sekundären Quelle im Vergleich zur primären Gewinnung energetisch vorteilhafter ist, bedarf es keiner speziellen Methode. Hier reicht ein simpler Vergleich der beiden Gewinnungsmöglichkeiten aus. Die Ermittlung einer energetisch optimalen EoL-RQ eines Metalls für einen spezifischen Untersuchungsrahmen benötigt hingegen ein methodisches Vorgehen. Die Grundlage hierfür bietet der Artikel von Stumm und Davis (1991). Die grafische Veranschaulichung der Methode ist in Abbildung 4.7 gegeben.

Der Grundgedanke dieser Methode ist, dass die Menge an Metall in allen verfügbaren sekundären Quellen⁶ durch das Recycling dieser Quellen oder aber durch die primäre Gewinnung des Metalls bereitgestellt werden kann. Die Aufwände, die mit dem Recycling verbunden sind, steigen mit zunehmender EoL-RQ überproportional an. Das ist durch die Annahme begründet, dass zuerst die qualitativ hochwertigen sekundären Quellen ausgeschöpft werden – also die Quellen mit hohen Metallkonzentrationen. Mit zunehmender EoL-RQ werden dann auch die Quellen angegangen, die geringere Qualitäten bzw. Metallkonzentrationen aufweisen (siehe hierzu insbesondere Abbildung 3.3 in Abschnitt 1.1.2). Um eine EoL-RQ von 100 % zu erzielen, müssten also alle sekundären Quellen vollständig recycelt werden, auch die, die nur sehr geringe Anteile des Zielmetalls enthalten, was mit entsprechend hohen Aufwänden verbunden wäre. Die Metalle, die durch ihre Nutzungsphase dissipativ verteilt wurden – was in der Praxis durchaus der Fall ist (Zimmermann 2015; Zimmermann und Gößling-Reisemann 2013; Ciacci et al. 2015) – sind zwar nach der Definition von UNEP (2011b) kein Bestandteil der EoL-RQ (siehe Abschnitt 2.1), können jedoch im Grunde auch als sekundäre Quelle verstanden werden. Wie hoch dieser dissipative Anteil ausfällt, ist stark von den Metallen abhängig. So macht z. B. der dissipative Verlust in der Nutzungsphase von Kupfer 1 % der Gesamtmasse aus, der von Zink ca. 19 % (Ciacci et al. 2015). Der theoretische Aufwand des Recyclings dieser dissipativ verteilten Metalle würde gegen Unendlich tendieren, was eine vollständige Kreislaufführung der Metalle nicht nur aus Gründen der Machbarkeit sondern zudem auch aus energetischer Sicht ausschließt.

Den Aufwänden der sekundären Gewinnung stehen die Aufwände der primären Gewinnung des Metalls gegenüber. Diese nehmen mit zunehmender EoL-RQ linear ab, da primäres Metall durch sekundäres Metall substituiert wird.⁷ Die Aufwände der primären und sekundären Metallproduktion sind dabei als Funktionen der EoL-RQ angegeben. Die Summe beider Funktionen ergibt die Gesamtaufwandsfunktion, deren Minimum die energetisch optimale Kombination aus primärer und sekundärer Metallgewinnung bzw. die energetisch optimale EoL-RQ ist. Eine höhere EoL-RQ würde zu einer Erhöhung des Gesamtaufwandes der Metallbereitstellung führen und somit zu negativen Trade-offs. In der qualitativen Darstellung in Abbildung 4.7 ist die energetisch optimale EoL-RQ bei x_{opt} erreicht. In diesem Punkt werden ca. 70 % der theoretisch verfügbaren

⁶Die Metallmassen aller verfügbaren sekundären Quellen entsprechen einer EoL-RQ von 100 %.

⁷Die lineare Abnahme des Aufwandes ist auf die lineare Abnahme der bereitzustellenden Metallmasse zurückzuführen. Der Aufwand pro Masseneinheit primär bereitgestelltes Metall bleibt konstant.

Metallmassen der sekundären Quellen recycelt. Die verbleibenden 30 % werden aus primären Quellen bereitgestellt. Der Aufwand, der betrieben werden muss, um die 70 % zu recyceln, liegt bei y_s . Der Aufwand der verbleibenden 30 % Primärgewinnung liegt bei y_p . Der resultierende Gesamtaufwand $y_{\text{total}} = y_s + y_p$ ist der benötigte Aufwand, um die gesamte Masse an Metall zu produzieren (entspricht 100 % EoL-RQ).

Abbildung 4.7 Qualitative Darstellung der Optimierungsmethode (Modifiziert nach Stumm und Davis 1991)

Diese Methode zur Ermittlung einer aus Aufwandssicht optimalen EoL-RQ ist mittlerweile in mehreren Studien vorgeschlagen (Steinbach und Wellmer 2010; Simon und Holm 2017; Rankin 2011, S. 278) und ebenso in produktspezifischen Untersuchungen angewandt (Quinkertz et al. 2001; Rydh und Karlström 2002; Schenk et al. 2004).

Bunge (2016) und Stäubli und Bunge (2015) schlagen eine Methode vor, die nicht die Minimierung des Gesamtaufwandes als Optimierungsziel ansetzt,

sondern die Maximierung der Aufwandsersparnis durch die Substitution von primären Rohstoffen durch sekundäre Rohstoffe. Diese Methode unterscheidet sich jedoch nur in ihrer Sichtweise von der Methode der Aufwandsminimierung. Mathematisch sind beide Methoden identisch. Die Methode der Ersparnismaximierung bietet somit keinen zusätzlichen Mehrwert.

Die vorgestellte Optimierungsmethode basiert auf drei zentralen Annahmen. Eine ist, dass primär und sekundär produzierte Metalle als vollständige Substitute agieren (1:1 Substitution). Das bedeutet, dass eine Masseneinheit an primärem Metall vollständig durch eine Masseneinheit desselben Metalls aus der sekundären Produktion ersetzt werden kann und vice versa. Diese Annahme unterliegt jedoch gewissen Ausnahmen. Im Falle von Aluminiumrecycling bspw. ist es ein zentrales Problem, dass unerwünschte Legierungselemente oder andere Metalle, die nicht vorab entfernt wurden, im metallurgischen Prozess nicht mehr entfernt werden können und sich so als Verunreinigungen anreichern (siehe auch Abschnitt 2.2). Die Qualität des sekundären Metalls sinkt und kann nicht mehr mit hochreinem Aluminium aus primären Quellen gleichgesetzt werden. Eine vollständige Substitution kann also nur angenommen werden, wenn die Qualität des sekundären Metalls der Qualität des primären Metalls entspricht (Zink und Geyer 2017). Es muss also ein funktionelles Recycling vorgenommen werden. In Kapitel 5 – der exemplarischen Anwendung der Optimierung – sind daher nur Metalle betrachtet, bei denen im Recyclingprozess typischerweise keine Qualitätsverluste entstehen.

Eine weitere Annahme ist, dass ein aktueller globaler Durchschnittswert der Energiebedarfe der primären Metallproduktion angesetzt werden kann. Dieser Wert kann über die Zeit variieren, da sich neben dem Erzgehalt auch die Produktions- und Fördertechniken verändern können (Norgate und Jahanshahi 2010; Rötzer und Schmidt 2018). Ein aktueller Wert gibt somit lediglich eine Momentaufnahme wieder. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Momentaufnahme für mehrere Jahre Gültigkeit besitzt, da die Planungshorizonte in diesem Bereich sehr langfristig sind und Investitionen in Technologien und Minen für mehrere Jahrzehnte getätigt werden. Die zeitliche Perspektive spielt demnach eine eher untergeordnete Rolle.

Wichtiger ist an dieser Stelle die Frage, aus welchen Minen und Aufbereitungsprozessen die Massen an primären Metallen kommen, die durch sekundäre Metalle substituiert werden und welche Aufwände tatsächlich damit verbunden sind? Denn die primäre Produktion eines Metalls kann, je nach Art der Mine (Über- oder Untertage), Aufbereitungsverfahren und Erzgehalt, unterschiedliche Energiebedarfe benötigen (Koppelaar und Koppelaar 2016; Norgate und Jahanshahi 2010). Geht man von dem Prinzip aus, dass die entscheidende Größe, die bestimmt, was substituiert wird, die Energie ist, so kann man von einer

Substitution analog zum *Merit-Order Prinzip* der Energiewirtschaft ausgehen. Sekundärmetall würde also zuerst die Minen verdrängen, die am energieintensivsten sind. Da die primäre Metallproduktion ein globales System ist, ist von entscheidender Bedeutung, welcher räumliche Untersuchungsrahmen für die sekundäre Gewinnung angesetzt wird. Ist die globale Ebene untersucht, so können beide Systeme vollständig miteinander verglichen werden. Die produzierten Massen beider Metallgewinnungssysteme wären dabei in einer ähnlichen Größenordnung. Die sekundäre Produktion würde also zuerst die energieintensivsten Minen substituieren, gefolgt von den energieeffizienteren. In diesem Fall ist es möglich, dass die sekundären Quellen, die die Grenze der aktuellen EoL-RQ darstellen, mit primären Quellen konkurrieren, die einen geringeren Energiebedarf aufweisen als der globale Durchschnittswert der Energiebedarfe. Ist der Untersuchungsrahmen, wie in der vorliegenden Arbeit, auf eine eher kleine Volkswirtschaft festgelegt, so kann nicht nach dem Merit-Order Prinzip vorgegangen werden. Denn es ist nicht bekannt, welche primären Quellen durch das Recycling der untersuchten Volkswirtschaft und das Recycling der restlichen Welt substituiert werden.

Der Energiebedarf wird jedoch nicht der (alleinige) entscheidende Faktor sein, der bestimmt was substituiert wird. Vielmehr ist anzunehmen, dass eine solche Entscheidung auf Basis ökonomischer Faktoren getroffen wird. Dabei sind bei der primären Metallgewinnung insbesondere Investitionskosten, die über mehrere Jahrzehnte getätigt werden, von entscheidender Bedeutung. Das kann dazu führen, dass Minen die solche Investitionen erst vor kurzen Zeiträumen getätigt haben, kurzfristig eher unelastisch auf systemische Änderungen reagieren, was die Substitutionsfrage zusätzlich erschwert.

Die bisher getätigten Ausführungen basieren auf der Annahme, dass bereits existierende Minen substituiert werden. Da der globale Metallbedarf zukünftig weiterhin steigen wird (siehe Abschnitt 1.1.3) ist jedoch anzunehmen, dass Änderungen in der EoL-RQ die Substitution möglicher zukünftiger Minen bedeutet. Welche primären Quellen mit welchen Energiebedarfen tatsächlich durch die sekundäre Produktion substituiert werden, kann nach aktuellem Wissensstand also nicht so einfach beantwortet werden. Hier sind noch weiterführende Forschungen notwendig.

Die Annahme eines aktuellen Durchschnittswertes der Energiebedarfe ist somit als erste Annäherung durchaus berechtigt. Um die oben angesprochenen möglichen Änderungen der Energiebedarfe der primären Produktion über die Zeit abzubilden, sind zudem fundierte Zukunftsszenarien angesetzt.

In Abbildung 4.7 sind die Aufwände des Recyclings als Funktion der EoL-RQ beschrieben. Diese dritte Annahme kann jedoch im besten Fall nur eine ungefähre

Annäherung sein, da die sekundären Quellen, die für ein Recycling zur Verfügung stehen, sehr inhomogen in ihren Qualitäten sind (siehe Abschnitte 5.2–5.4). Die Aufwandsfunktion des Recyclings besteht daher aus diskreten Datenpunkten, welche die Recyclingaufwände der einzelnen sekundären Quellen angeben. Die detaillierte mathematische Beschreibung der Ermittlung dieser Datenpunkte sowie die Anwendung der Methodik sind nachfolgend aufgeführt.

4.4.2 Mathematische Beschreibung der Optimierung

Im vorherigen Abschnitt ist bereits erwähnt, dass die Aufwände – also der KEA – des Recyclings in der Realität nicht anhand einer Funktion abgebildet werden können, sondern als diskrete Datenpunkte abgetragen sein müssen. Jeder Datenpunkt entspricht dabei einer sekundären Quelle, die theoretisch für ein Recycling zur Verfügung steht. Die sekundären Quellen sind als x_i definiert, wobei n die Gesamtanzahl aller sekundären Quellen ist (siehe auch Abschnitt 4.2). Die sekundären Quellen x_i sind Elemente der Menge T und als Objekte mit verschiedenen Eigenschaften zu verstehen. Eine Eigenschaft ist die in einer sekundären Quelle x_i enthaltenen Masse des zu recycelnden Metalls $m(x_i)$, das in einem zeitlich und räumlich definierten Untersuchungsrahmen theoretisch für ein Recycling zur Verfügung steht. Die Summe aller $m(x_i)$ entspricht einer EoL-RQ von 100 %. Metallmassen, die als dissipativ in der Nutzung eingestuft sind, sind nach der Definition von UNEP (2011b) kein Bestandteil der EoL-RQ (siehe Abschnitt 2.1) und daher auch nicht in den exemplarischen Anwendungen in Kapitel 5 erfasst.

Da unzureichende Sammlungen der sekundären Quellen die EoL-RQ schmälern, müssen Sammelquoten $SQ(x_i)$ berücksichtigt werden. Zudem unterliegen Recyclingprozesse immer Prozessineffizienzen in der mechanischen Aufbereitung (van Schaik et al. 2004) und thermodynamischen Grenzen in den metallurgischen Verfahren (Castro et al. 2004), die ebenfalls zur Schmälerung der EoL-RQ beitragen (siehe hierzu auch Abschnitt 2.2). Es müssen daher die Recyclingeffizienzen der mechanischen Aufbereitung $RE_A(x_i)_j$ und metallurgischen Aufbereitung $RE_M(x_i)_j$ ebenfalls für jeden Prozess ($j = 1, 2, \dots, m$) berücksichtigt werden. Der Anteil, zu dem eine sekundäre Quelle x_i zur EoL-RQ beiträgt, ist demnach durch die folgende Formel (4.6) bestimmt:

$$\frac{m(x_i) \cdot SQ(x_i) \cdot \prod_{j=1}^m RE_A(x_i)_j \cdot RE_M(x_i)_j}{\sum_{i=1}^n m(x_i)} \quad (4.6)$$

Die unter den gegebenen $SQ(x_i)$, $RE_A(x_i)_j$ und $RE_M(x_i)_j$ maximal mögliche EoL-RQ ist durch Formel (4.7) bestimmt. Hier würden also alle theoretisch verfügbaren sekundären Quellen nach den aktuellen Sammelquoten und Recyclingeffizienzen recycelt werden.

$$\frac{\sum_{i=1}^n (m(x_i) \cdot SQ(x_i) \cdot \prod_{j=1}^m RE_A(x_i)_j \cdot RE_M(x_i)_j)}{\sum_{i=1}^n m(x_i)} \quad (4.7)$$

Für die theoretisch mögliche EoL-RQ der Formel (4.7) können reale KEA des Recyclings eines Zielmetalls aus den jeweiligen sekundären Quellen x_i durch die in Abschnitt 4.2 beschriebene Modellbildung ermittelt werden. Diese sind als $KEA_S(x_i)$ definiert. Die Anordnung dieser $KEA_S(x_i)$ in Bezug zur EoL-RQ erfolgt, entsprechend der getroffenen methodischen Annahme aus Abschnitt 4.4.1, nach ihrer Größe – siehe hierzu Formel (4.8).

$$KEA_S(x_1) < KEA_S(x_2) < KEA_S(x_3) \dots < KEA_S(x_n) \quad (4.8)$$

Im Sinne einer Optimierung des gesamten KEA der Metallproduktion KEA_G sollte das Recycling eines Metalls für alle sekundären Quellen x_i durchgeführt werden, die einen geringeren $KEA_S(x_i)$ aufweisen als der KEA der Gewinnung desselben Metalls aus primären Quellen (KEA_P). Somit sind alle x_i , deren Recycling des Zielmetalls zur Minimierung des KEA_G beitragen, Elemente der Menge R , die wiederum Teil der Menge T sind.

$$R = \{x_i \in T / KEA_S(x_i) < KEA_P\} \quad (4.9)$$

Die letzte sekundäre Quelle x_i , deren Metallrecycling noch zur Minimierung des KEA_G beiträgt, ist demnach die mit dem höchsten $KEA_S(x_i)$ der Menge R und nachfolgend als x_k definiert.

$$KEA_S(x_k) \equiv \max\{KEA_S(R)\} \quad (4.10)$$

Die energetisch optimale EoL-RQ ist dann erreicht, wenn der KEA_G minimal ist:

$$\min\{KEA_G\} = \frac{\sum_{i=1}^k (m(x_i) \cdot SQ(x_i) \cdot \prod_{j=1}^m RE_A(x_i)_j \cdot RE_M(x_i)_j)}{\sum_{i=1}^n m(x_i)} \quad (4.11)$$

Die energetischen Ersparnisse $KEA_{Ersparnisse}$, die durch eine optimierte EoL-RQ im Vergleich zu einer vollständigen Metallproduktion aus primären Quellen erzielt werden, sind durch Formel (4.12) bestimmt.

$$KEA_{Ersparnisse} = \sum_{i=1}^k \left((KEA_P - KEA_S(x_i)) \cdot m(x_i) \cdot SQ(x_i) \cdot \prod_{j=1}^m RE_A(x_i)_j \cdot RE_M(x_i)_j \right) \quad (4.12)$$

Mit den Definitionen aus Gleichung (4.9) und (4.10) ist gewährleistet, dass die $KEA_{Ersparnisse} > 0$ sind. Der durchschnittliche KEA des Recyclings bei einer optimierten EoL-RQ ($\overline{KEA_S}$) ist durch das mit den recycelten Massen gewichtete arithmetische Mittel der $KEA_S(x_i)$ mit $x_i \in R$ definiert:

$$\overline{KEA_S} = \frac{\sum_{i=1}^k (KEA_S(x_i) \cdot m(x_i) \cdot SQ(x_i) \cdot \prod_{j=1}^m RE_A(x_i)_j \cdot RE_M(x_i)_j)}{\sum_{i=1}^k (m(x_i) \cdot SQ(x_i) \cdot \prod_{j=1}^m RE_A(x_i)_j \cdot RE_M(x_i)_j)} \quad (4.13)$$

Eine EoL-RQ, die über die der Formel (4.7) hinausgeht, kann nur durch Steigerungen der Sammelquoten $SQ(x_i)$ und Recyclingeffizienzen $RE(x_i)_j$ realisiert werden. Dabei ist von entscheidender Bedeutung, wie sich der $KEA_S(x_i)$ bei Änderungen dieser Parameter verhält. Ob mit einer Erhöhung der Sammelquoten $SQ(x_i)$ auch gleichzeitig Erhöhungen des $KEA_S(x_i)$ verbunden sind, kann nur schwer prognostiziert werden. Grundsätzlich ändert sich die durchschnittliche Transportdistanz der Sammellogistik (siehe Abschnitt 4.3.1) mit steigender $SQ(x_i)$ nicht. Wesentlich dafür, dass die EoL-Produkte erst gar nicht den Weg in eine Sammlung finden, sind insbesondere soziale und gesellschaftliche Faktoren. Das zeigen Untersuchungen am Beispiel von Smartphones (Welfens et al. 2016; Martinho et al. 2017). Des Weiteren führen illegale Exporte von EoL-Produkten und legale Exporte von als Gebrauchtgeräte deklarierten Produkten zu einer Schmälerung der Sammelquote $SQ(x_i)$ (Kohlmeyer et al. 2017; Sander und Schilling 2010). Auch hier liegt im Grunde kein Aufwandsproblem vor, das mit einem höheren Energieeinsatz gelöst werden könnte, sondern vielmehr ein politisches Problem. Somit kann angenommen werden, dass die Erhöhung der Sammelquote $SQ(x_i)$ der sekundären Quellen zumindest nicht unmittelbar mit dem Energiebedarf zusammenhängt. Diese Annahme gilt jedoch nur für die sekundären Quellen, für die auch Transportdistanzen nach der in Abschnitt 4.3.1 vorgestellten Methode ermittelt werden können. Eine generelle Erhöhung der Sammelquoten, also auch von z. B. dissipativen Metallfraktionen, ist von dieser

Annahme ausgenommen. In den nachfolgenden exemplarischen Anwendungen sind die Energiebedarfe bei Erhöhungen der $SQ(x_i)$ anhand bestimmter Parameter variiert, um die aufgezeigten Unsicherheiten zu minimieren.

Welche Änderungen der $KEAS(x_i)$ mit Erhöhungen der Recyclingeffizienzen $REA(x_i)_j$ und $REM(x_i)_j$ verbunden sind, kann nicht anhand realer Daten erhoben werden, sondern müsste über umfangreiche theoretische Modelle ermittelt werden – das zeigen u. a. Studien im Bereich des Altautorecyclings (Castro et al. 2005; van Schaik et al. 2004; van Schaik et al. 2002). Erste Ansätze existieren auch bereits für das Recycling von Elektroaltgeräten (Reuter et al. 2015; Reuter et al. 2018). Die Entwicklung solcher umfangreicher theoretischer Modelle würde bei der vorliegenden Arbeit, die mit der Analyse von drei kompletten Metallrecyclingsystemen sehr breit angelegt ist, zu weit führen. Ein semi-quantitativer Ansatz ist von Stäubli und Bunge (2015) vorgeschlagen. In dieser Publikation ist die Annahme getroffen, dass Erhöhungen der Recyclingeffizienzen $RE(x_i)_j$ grundsätzlich einem exponentiellen Wachstum unterliegen. Eine solche Annahme ist jedoch ohne jegliche empirische Grundlage, daher mit hohen Unsicherheiten verbunden und führt somit zu keinem neuen Erkenntnisgewinn.

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

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