

# Beispielhafte Erarbeitung einer Wertschöpfungskette und einer Ökobilanz von Aluminiumfolie

## Prüfungsstudienarbeit

Im Fach:

Stoffstrom- und Ressourcenmanagement

vorgelegt von:

Dobler Christoph Matr.-Nr.: 20162740

chris-dobler@hotmail.de

Studienfachsemester 2

Betreuer:

Prof. Dr. rer. nat. Petra Schneider

Magdeburg, März 2017

Hochschule Magdeburg-Stendal

Fachbereich: Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit

Studiengang: Ingenieurökologie

# Aufgabenstellung

Beispielhafte Erarbeitung einer Wertschöpfungskette und einer Ökobilanz

Die Hausarbeit beinhaltet die Erstellung einer Stoffstromanalyse im Rahmen einer Ökobilanz sowie die Darstellung einer Wertschöpfungskette für ein Produkt. Die Durchführung von Ökobilanzen ist in der ISO Norm 14040 und 14044 dargestellt. Die Grundstruktur der Ökobilanz ist mit ihren vier Phasen und Bestandteilen beschrieben:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens,
- Sachanalyse,
- qualitative und quantitative Analyse,
- Wirkungsabschätzung,
- Auswertung der Ökobilanz.

Ziel der Hausarbeit ist die Bearbeitung der Wertschöpfungskette natürlicher Ressourcen sowie daraus abgeleitet eines typischen Produktes aus dieser Ressource, für das die Ökobilanz darzustellen und auszuwerten ist. Zur Auswahl stehende Themen für die Erarbeitung der Ökobilanzen /

Wertschöpfungsketten sind:

- Eisen, Mangan, Kupfer, Vanadium, Lithium
- Chrom, Titan, Nickel, Zink, Gold, Silber, Uran
- Aluminium, Lithium, Silizium,
- Phosphor, Kalium, Calcium, Schwefel
- Erdöl, Erdgas, Kohle, Schiefergas, Manganknollen.

Die Hausarbeiten sollen in Form einer Präsentation ab Dezember 2014 in einer 30-minütigen Präsentation

im Rahmen der Vorlesungsreihe „Stoffstrom- und Ressourcenmanagement“ vorgestellt und diskutiert werden. Inhaltliche Schwerpunkte der Präsentation bzw. der Hausarbeit sind:

- Darstellung der Ressourcen (Welt, Europa, Deutschland)
- Darstellung der Gewinnung und Verarbeitung
- Darstellung der Produkte und Abfälle
- Ökobilanz (Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, qualitative und quantitative Stoffstromanalyse, Wirkungsabschätzung)
- Darstellung der gesamten Wertschöpfungskette
- Diskussion der Potenziale für Ressourceneffizienz und Optimierung.

Außerdem ist eine schriftliche Version der Hausarbeit bis Ende des Semesters zu erstellen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>2</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>7</b>
<b>2 Die Ressource Aluminium</b> .....	<b>8</b>
2.1 Vorkommen .....	8
2.2 Gewinnung und Verarbeitung .....	9
2.2.1 Bayer-Verfahren .....	9
2.2.2 Schmelzflusselektrolyse.....	9
2.2.3 Herstellung von Sekundäraluminium .....	10
2.2.4 Herstellung von Aluminiumfolie.....	11
2.3 Produkte und Abfälle .....	11
<b>3 Ökobilanz</b> .....	<b>14</b>
3.1 Festlegung des Untersuchungsziels- und Untersuchungsrahmens .....	14
3.1.1 Untersuchungsziel .....	14
3.1.2 Untersuchungsrahmen .....	14
3.1.3 Methodik .....	16
3.2 Erstellung der Sachbilanz .....	17
3.2.1 Bauxitabbau .....	17
3.2.2 Tonerdeproduktion .....	18
3.2.3 Anodenherstellung .....	19
3.2.4 Elektrolyse .....	19
3.2.5 Guss.....	20
3.2.6 Walzwerk .....	20
3.2.7 Recycling.....	21
3.2.8 Energiebereitstellung .....	21
3.3 Stoffstromdiagramm.....	23
3.4 Wirkungsabschätzung.....	24
3.4.1 Kumulierter Energieaufwand (KEA).....	24
3.4.2 CO <sub>2</sub> Emissionen.....	25
3.4.3 CO <sub>2</sub> -Äquivalente .....	25
3.4.4 Ressourcenverbrauch.....	26
3.4.5 Versauerungspotenzial.....	27
3.4.6 Ozonbildungspotenzial .....	28

---

3.5	Diskussion und Verbesserungspotenziale .....	29
<b>4</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>34</b>
5.1.1	Bauxitabbau.....	34
5.1.2	Tonerdeproduktion .....	34
5.1.3	Anodenherstellung .....	35
5.1.4	Elektrolyse .....	36
5.1.5	Guss.....	37
5.1.6	Walzwerk.....	38

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: weltweite Bauxitreserven und Mienenproduktion nach Ländern .....	8
Abbildung 2: Querschnitt durch Elektrolysezelle .....	10
Abbildung 3: Verwendung von Aluminium in Deutschland nach Industriezweig im Jahr 2015.....	12
Abbildung 4: Wertschöpfungskette Alufolie .....	13
Abbildung 5: qualitatives Stoffstromdiagramm für Aluminiumfolie (eigene Darstellung).....	17
Abbildung 6: Quantitatives Stoffstromdiagramm .....	23
Abbildung 7: Kumulierter Energieaufwand.....	24
Abbildung 8: CO2 Emissionen.....	25
Abbildung 9: CO2-Äquivalente .....	26
Abbildung 10: Ressourcenverbrauch .....	27
Abbildung 11: Versauerungspotenzial .....	28
Abbildung 12: Ozonbildungspotenzial .....	29

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bauxitabbau – Sachbilanz.....	18
Tabelle 2: Tonerdeproduktion - Sachbilanz .....	18
Tabelle 3: Anodenherstellung - Sachbilanz .....	19
Tabelle 4: Elektrolyse - Sachbilanz .....	19
Tabelle 5: Guss - Sachbilanz.....	20
Tabelle 6: Walzwerk - Sachbilanz .....	21
Tabelle 7: Stromverbrauch .....	22
Tabelle 8: Fossile Energieträger als direkter Input (Endenergie) .....	22
Tabelle 9: Rohölreserveäquivalente .....	26
Tabelle 10: Bauxitabbau – Sachbilanz ausführlich .....	34
Tabelle 11: Tonerdeproduktion - Sachbilanz ausführlich .....	34
Tabelle 12: Anodenherstellung - Sachbilanz ausführlich.....	35
Tabelle 13: Elektrolyse - Sachbilanz ausführlich.....	36
Tabelle 14: Guss - Sachbilanz ausführlich .....	37
Tabelle 15: Walzwerk - Sachbilanz ausführlich .....	38

# 1 Einleitung

In unserem Täglichen Leben verbrauchen wir eine große Menge verschiedenster Industrieprodukte, ohne zu wissen woher diese überhaupt kommen und was mit ihnen passiert, wenn wir sie wegschmeißen. Ein ganz praktischer Küchenhelfer gerät dabei immer mehr unter Verruf, die Alufolie. Es ist bekannt, dass Aluminium in seiner Herstellung extrem energieintensiv ist und dabei ebenso umweltschädliche Abfälle entstehen. Auch die Gefahren für unsere Gesundheit, die eine so exzessive Nutzung dieses Metalls mit sich bringen, rückt diesen eigentlich so vielversprechenden Rohstoff in ein dunkles Licht.

Um einen Überblick über die Stoff- und Energieströme zu erhalten und die resultierenden Umweltauswirkungen zu bewerten, beweist sich die Ökobilanz als sehr hilfreiches Instrument. Hierbei wird der Gesamte Lebensweg eines Produktes untersucht, von der Erzeugung bis zur Entsorgung. Dies soll vor allem den Erzeugern dienen ihren Betrieb auf mögliche ökologische Risiken und Schwachstellen systematisch zu überprüfen und Optimierungspotenziale aufzuzeigen.

Aluminium ist ein vielseitig verwendbares Metall, welches in fast allen Bereichen des modernen Lebens eine Rolle spielt. Seine Einsatzbereiche reichen vom Verkehr über den Maschinenbau, Architektur über Verpackungen bis hin zur Kosmetik. Es ist mit 8% das dritthäufigste Element in der Erdkruste, da es so unedel ist liegt Aluminium jedoch nur in Verbindungen mit anderen Nichtmetallen vor, was die Herstellung aufwendig macht. Dies wird aufgrund der guten Eigenschaften in Kauf genommen, denn Aluminium ist ein sehr leichtes, aber dennoch starkes Material und lässt sich zugleich leicht formen. Auch Recyceln lässt es sich gut, wodurch 95% der Energie im Vergleich zur Primärproduktion eingespart werden können. Dennoch findet sich auf dem Markt kaum Recyclingalufolie (der wertstoffblog 2017).

Diese Arbeit untersucht die Herstellung und Verwertung von Alufolie. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Energieversorgung und die Wahl der Energieträger gesetzt, um deren unterschiedliche Umweltauswirkungen zu vergleichen. Zuerst wird jedoch die Ressource Aluminium näher vorgestellt. Dazu werden zunächst die weltweiten Vorkommen präsentiert. Nachfolgend wird der Prozess der Aluminiumgewinnung und Verarbeitung näher beschrieben, was einen ersten Einblick in die Stoffströme ermöglicht. Um den Lebensweg weiter zu betrachten, werden typische Aluminiumprodukte und deren Verwertung vorgestellt. Danach folgt das Herzstück dieser Arbeit, die Ökobilanz. Zuerst werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen festgelegt. Danach folgt die Analyse der Stoffströme und die Wirkungabschätzung. Abschließend werden die Ergebnisse ausgewertet und es werden Maßnahmen zum Ressourcenschutz und zur Verbesserung diskutiert.

## 2 Die Ressource Aluminium

### 2.1 Vorkommen

Wie bereits erwähnt kommt Aluminium in der Natur sehr häufig vor und stellt sogar das Metall mit den größten Vorkommen dar. Jedoch findet man es fast nie in reiner Form. Es wird aus dem Erz Bauxit, einem Verwitterungsprodukt aus Kalk- und Silikatgestein gewonnen. Es enthält meist mehr als 50 % Aluminiumoxide und Hydroxide und hat einen Aluminiumgehalt von 20 – 30 % (Ostermann 2014). Bauxit wird zumeist im Tagebau gewonnen und wird zu fast 90% in den Ländern des Tropengürtels gefördert. Die weltweiten Reserven an Bauxit betragen 24.870 Mio. t (Statista 2017c) wovon jährlich 262 Mio. t (Statista 2017a) verarbeitet werden. In Abbildung 1 sind die Reserven und die Förderung der wichtigsten Länder aufgetragen. Es ist ersichtlich das China und Australien die weltweit größten Bauxitförderer darstellen, wobei Australien immense Reserven hat. Das meiste Bauxit besitzt jedoch das kleine Land Guinea. Weitere Große Vorkommen befinden sich auch in Brasilien, Vietnam und Jamaika. Auch in Europa finden sich kleine Vorkommen. Griechenland, Frankreich und Ungarn besitzen davon die größten Reserven. Auch Deutschland hat diese Vorkommen, jedoch ist eine Förderung aufgrund der geringen Menge nicht möglich.

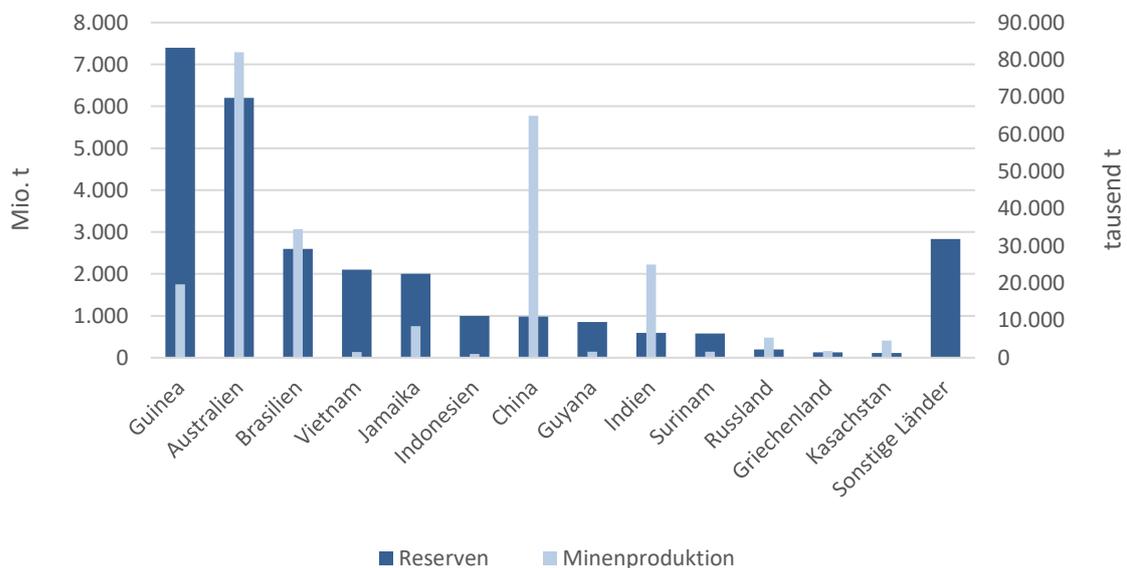


Abbildung 1: weltweite Bauxitreserven und Mienenproduktion nach Ländern<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Statista 2017a & Statista 2017c

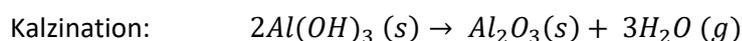
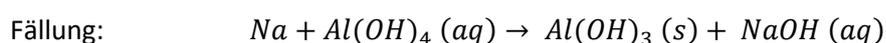
## 2.2 Gewinnung und Verarbeitung

Die Gewinnung von Primäraluminium erfolgt in zwei Prozessstufen. In einem ersten Verfahren wird aus dem Bauxit Aluminiumoxid gewonnen, dies geschieht nach dem sogenannten Bayer-Verfahren. Danach erfolgt die Umwandlung mittels Schmelzflusselektrolyse zu elementarem Aluminium.

### 2.2.1 Bayer-Verfahren

Das Bayer-Verfahren ist nach Carl Josef Bayer benannt, einem österreichischen Chemiker. 95% des weltweit erzeugten Aluminiums wird auf diese Weise gewonnen (Korneliusdóttir 2014). Nach dem Bauxitabbau wird dieses vorzerkleinert und mit Hilfe einer Aufschlusslauge gemahlen (Ostermann 2014). Nach einer weiteren Zugabe von Lauge in Form von  $\text{Na}_2\text{O}$  wird das Gemisch in Autoklaven oder Rohrreaktoren bei 160–270 °C aufgeschlossen. Dabei löst sich das Aluminiumoxid als Natriumaluminat und befindet sich in der flüssigen Phase. Die übrigen ungelösten Bestandteile bleiben zurück und bilden den sogenannten Rotschlamm. Nach der Abtrennung des Rotschlammes, wird die Natriumaluminatlauge auf ca. 60 °C abgekühlt und mit Aluminiumhydroxid aus der Produktion versetzt. Durch stetiges Rühren kristallisiert das Aluminiumhydroxid und es fällt aus. Danach wird es über Vakuum-Trommelfilter abgetrennt und gründlich gewaschen. Die zurückbleibende Lauge, welche den Rest des Aluminiums enthält wird eingedampft und als Aufschlusslauge in den Kreislauf zurückgeführt.

Im nächsten Verfahrensschritt wird das Aluminiumhydroxid zu Aluminiumoxid kalziniert. Dazu wird das Aluminiumhydroxid in Drehrohr- oder Wirbelbettöfen bei über 1200 °C gebrannt.



### 2.2.2 Schmelzflusselektrolyse

Die aus dem Bayer-Prozess entstehende Tonerde (Aluminiumoxid) wird in einem nächsten Verfahrensschritt zu reinem Aluminium umgewandelt (Ostermann 2014). Dies funktioniert mithilfe der Schmelzflusselektrolyse (Hall-Héroult-Prozess), dabei wird das Aluminiumoxid bei ca. 950 °C reduziert. Mithilfe dieser Technik wird der Hohe Schmelzpunkt von 2050 °C um 1100 °C gesenkt. Die Elektrolysezellen ist mit Kryolith ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) gefüllt, welches als Elektrolyt dient. In diesem sind 5-7% Aluminiumoxid gelöst. Die Kathode stellt das geschmolzene Aluminium dar. Dieses befindet sich in, mit Kohlenstoffsteinen ausgekleideten Stahlwannen auf dem Boden der Zelle. Die Anoden bestehen aus Petrolkoks und Pech und

sind als Blöcke in das Elektrolyt getaucht. Bei der Reaktion werden diese Blöcke verbraucht, da der enthaltene Kohlenstoff mit dem Sauerstoff zu Kohlenmonoxid und Kohlendioxid, dem sogenannten Anodengas reagiert. Das so erzeugte Metall kann dann vom Boden abgesaugt werden. Der schematische Aufbau einer solchen Elektrolysezelle ist in Abbildung 2 dargestellt. Das Hütten-Aluminium wird in einem Walzwerk zu Halbzeugen wie beispielsweise Blechen verarbeitet.

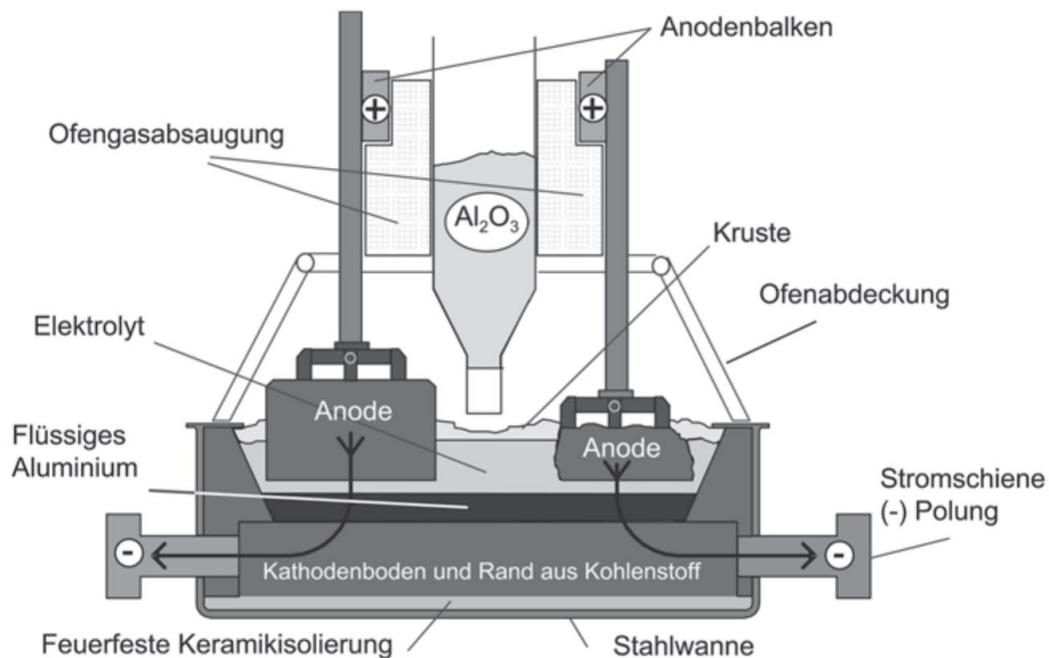


Abbildung 2: Querschnitt durch Elektrolysezelle<sup>2</sup>

### 2.2.3 Herstellung von Sekundäraluminium

Für die Herstellung von Sekundäraluminium, also das Recycling von Aluminiumschrott werden die Aluminiumteile in Trommelöfen geschmolzen. Zuerst müssen jedoch die vermischten Altschrotte aufbereitet und von Verunreinigungen getrennt werden. Dazu bedient man sich Schredderanlagen, Magnetabscheidern, Wirbelstromabscheidern oder Schwimm-Sink-Anlagen (Ostermann 2014). Die Neuschrotte, also Abfälle aus der Produktion, sowie Krätze können direkt eingeschmolzen werden. Bei der Krätze handelt es sich um ein Abfallprodukt der Aluminiumverarbeitung, welches reines Aluminium und feine Oxidpartikel enthält (Maschinenbau-Wissen.de 2017). Beim Schmelzvorgang bei ca. 800°C entsteht durch die Reaktion mit Sauerstoff an der Oberfläche automatisch neue Krätze. Diese muss nach und nach von der Oberfläche entfernt werden. Es gibt jedoch auch die Möglichkeit die Bildung dieses

<sup>2</sup> Ostermann 2014

Abfallproduktes teilweise zu unterbinden. Dazu wird die Oberfläche mit speziellen Salzen abgedeckt. Bei der Produktion einer Tonne Recycling-Material fallen etwa 300 bis 500 Kilogramm Salzschlacke an, welche danach wieder aufbereitet werden kann.

#### **2.2.4 Herstellung von Aluminiumfolie**

Typischerweise beginnt die Produktion von Aluminiumfolie mit einem 20 t schweren Block. In Walzanlagen wird dieser dann schrittweise in immer dünnere Platten gewalzt. Zu Beginn haben die Blöcke eine Dicke von 500-700 mm, diese können auf bis zu 6 µm dünne Folien reduziert werden. Zu Beginn wird die Oberfläche abgefräst, um ihn von Unebenheiten und Verunreinigungen zu befreien. Damit der Block einfach geformt werden kann, wird er auf 500 °C erhitzt und dann im heißen Zustand auf 2-5 mm dicke Bleche gewalzt. Während dieses Vorgangs wird eine Emulsion aus Öl und Wasser genutzt, um das Blech zu kühlen und zu schmieren. Um die Stärke noch weiter zu reduzieren wird nun kalt gewalzt, denn zu hohe Temperaturen können zu Explosionen führen. Dazu wird ein kerosinartiges Schmiermittel verwendet. Da die Folie nicht beliebig dünn gewalzt werden kann wird nach der einfachen Walzung die Folie doppelt gewalzt. Das heißt sie wird einmal übereinander gelegt um eine noch geringere Dicke zu erreichen. Somit kommt es an der Kontaktstelle zwischen den beiden Folie zu einer freien Umformung, weshalb die eine Seite immer etwas matter erscheint. Während des Walzvorgangs fallen immer wieder Aluminiumabfälle an, diese werden dann zurück in den Produktionsprozess geführt.

### **2.3 Produkte und Abfälle**

Wie im vorherigen Abschnitt gesehen wurde unterscheidet man Primär- und Sekundäraluminium, also Recyclingaluminium. Letzteres wird aufgrund seiner heterogenen Zusammensetzung meist nur für Gusslegierungen verwendet (Ostermann 2014). Man unterscheidet Grundsätzlich Guss- und Knetlegierungen, wobei die Knetlegierungen, wie der Name schon sagt meist in Walzwerken verarbeitet werden.

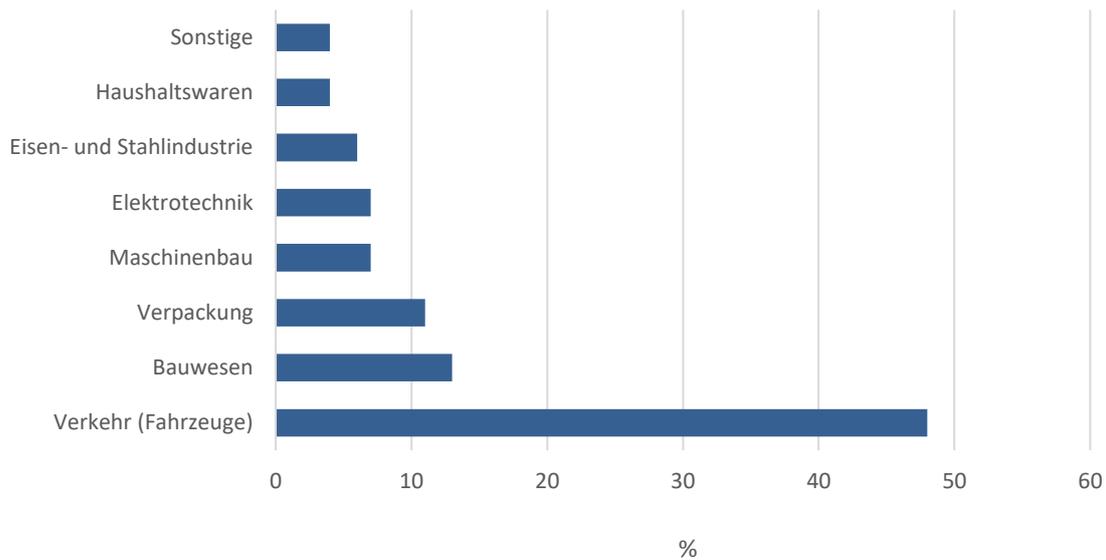


Abbildung 3: Verwendung von Aluminium in Deutschland nach Industriezweig im Jahr 2015<sup>3</sup>

Der Werkstoff Aluminium zeichnet sich vor allem durch sein geringes Gewicht aus und wird somit auch dort eingesetzt wo dieser Faktor eine wichtige Rolle spielt, nämlich im Verkehrswesen (Arnold 2013). Insbesondere im Flugverkehr ist es unabdingbar. Beispielsweise besteht ein Airbus A380 zu 66 % aus leichten Aluminiumblechen. Nach dem Sektor Transport und Verkehr ist das Bauwesen der zweitwichtigste Anwendungsbereich für Aluminiumprodukte geworden (Ostermann 2014). Gründe dafür sind insbesondere die sehr gute Witterungsbeständigkeit, die Ästhetik, niedrige Instandhaltungskosten und die gute Verarbeitbarkeit. Letztere ist im hohen Maße auf die breite Palette an Gestaltungsmöglichkeiten durch die Strangpresstechnik zurückzuführen. Fensterrahmen, Türen und Fassadenelemente stellen die Hauptanwendungsgebiete dar. Auch in der Verpackungsindustrie hat sich Aluminium sehr schnell etabliert. Verpackungen aus Aluminium sparen Platz, sind leicht und schlank (GDA 2017). Durch den Einsatz kann auf Umverpackungen sehr häufig verzichtet werden. Dies spart Platz und Gewicht. Aluminium ermöglicht somit, dass viel Produkt bei wenig Verpackung befördert und gleichzeitig die Abfallentsorgung entlastet werden kann. Weitere Vorteile gegenüber anderen Materialien sind die vollkommene Undurchlässigkeit für Gase, Flüssigkeiten und Licht sowie die sehr gute Verarbeitbarkeit. Im Maschinen- und Apparatebau spielen neben der chemischen Beständigkeit und den mechanischen Eigenschaften vor allem die guten Formgebungsmöglichkeiten durch Gießen und Strangpressen sowie die hervorragende spa-

<sup>3</sup> Statista 2017d

nende Bearbeitbarkeit eine wesentliche Rolle (Ostermann 2014). Durch die hohe elektrische Leitfähigkeit und das geringe spezifische Gewicht machen Aluminium zu einem wichtigen Werkstoff in der Elektroindustrie (Arnold 2013). Unter den Metallen hat es das beste Verhältnis von elektrischer Leitfähigkeit zur Dichte. Daher werden Hochspannungskabel, die im Freien hängen, aus Aluminium und nicht aus dem leitfähigen Kupfer gefertigt.

Neben den bereits genannten, äußerst nützlichen Eigenschaften ist Aluminium aus Sicht der Kreislaufwirtschaft ein sehr vielversprechendes Material, da es einfach recycelt werden kann (vgl. Kap. 0). Die Recyclingquote von Aluminium ist in den letzten Jahren stark gestiegen. Beispielsweise lag diese im Jahr 2000, im Bereich Verpackungen bei ca. 75 % und stieg auf über 91 % im Jahr 2014 (Statista 2017b). Auch Sekundäraluminium wird immer häufiger verwendet, da der Energieaufwand deutlich geringer ist. So stammten im Jahr 2010 über 60 % des Aluminiums aus Sekundärquellen (Wilts et al. 2014). Besonders Neuschrotte aus der Halbzeugverarbeitung, insbesondere dann, wenn sie innerbetrieblich angefallen sind, lassen sich gut recyceln, da die Zusammensetzung bereits bekannt ist. In Deutschland ist bereits ein flächendeckendes Netz von Metallhändlern vorhanden, welche die Aluminiumschrotte zusammentragen, sortieren, pressen und klassifizieren (Ostermann 2014). Aufgrund des hohen Materialwertes der Aluminiumschrotte, können alle Kosten zur Aufbereitung gedeckt werden.

Im Fall der Alufolie ist ein vollständiges Recycling noch nicht möglich. Dies liegt insbesondere an der Sortierung und Aufbereitung. Ein Großteil der verbrauchten Alufolie landet meistens im Restmüll, wo eine Sortierung nicht möglich ist. Das Aluminium befindet sich dann entweder als Aluminiumoxid im Filterstaub oder in der MVA-Schlacke. Mithilfe des dualen Systems kann das Aluminium aussortiert und wiederaufbereitet werden. In nachfolgender Abbildung ist der Lebensweg bzw. die Wertschöpfungskette von Alufolie dargestellt.

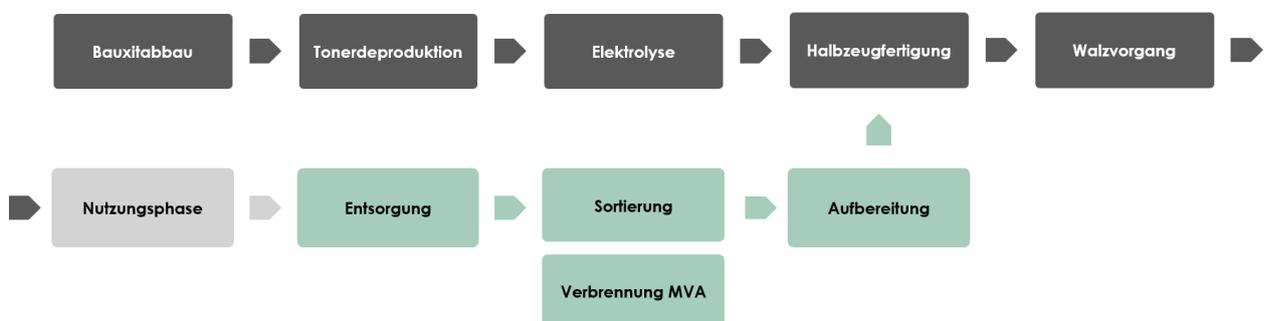


Abbildung 4: Wertschöpfungskette Alufolie

# 3 Ökobilanz

## 3.1 Festlegung des Untersuchungsziels- und Untersuchungsrahmens

In diesem Kapitel werden die Systemgrenzen der zu untersuchenden Prozesse festgelegt und das Ziel dieser Ökobilanz dargestellt.

### 3.1.1 Untersuchungsziel

Das Ziel dieser Studie ist es bestimmte Umweltauswirkungen, Materialverbräuche und Energieverbräuche bei der Herstellung einer Rolle Aluminiumfolie zu ermitteln. Es soll insbesondere aufgezeigt werden wieviel Energie notwendig ist um eine nur geringe Menge Aluminium zu produzieren und die Verbraucher zu sensibilisieren. Neben dem hohen Energieaufwand werden ebenso die Umweltauswirkungen anhand von Wirkungskategorien näher dargestellt.

Als Datengrundlage für die Herstellung des Primäraluminiums bis zum Guss der Blöcke dient eine Ökobilanz der (The Aluminum Association 2013). Diese betrachtet den Herstellungsprozess von Primäraluminium in Nordamerika. Genauere Angaben zu den Daten werden im Kapitel 3.2 gemacht. Für den Weiteren Walzprozess dient eine Studie der (Helsinki University of Technologie 2017). Die Bereitstellung der Energie und deren Erzeugung werden durch Probas-Datensätze dargestellt (umweltbundesamt 2017). Auch der Prozess des Recyclings und der Wasseraufbereitung wird anhand von Probas-Daten erstellt.

### 3.1.2 Untersuchungsrahmen

Die Untersuchung erfolgt für die Herstellung von Alufolie, d.h. vom Abbau des Bauxits bis zum Walzprozess und der Verpackung. Aufgrund von Lücken in der Datenerhebung kann die Distribution und die Nutzungsphase nicht betrachtet werden. Auch bei der Verwertung bzw. beim Recycling gibt es Lücken. Dies betrifft das Sammeln und aufbereiten des Mülls. Deswegen wurde für diese Phase lediglich die Aufbereitung von Aluminiumschrotten betrachtet. Es ist darauf hinzuweisen, dass sich der Herstellungsprozess auf die im Jahre 2010, in Nordamerika typischen technischen Verfahren und daraus resultierenden Verbräuche bezieht.

Die Systemgrenze enthält:

- Den Bauxitabbau
- Den Transport des Bauxits, Aluminiums und der fertigen Halbzeuge
- Die Herstellung der Tonerde
- Den Prozess der Elektrolyse

- Die Herstellung der Anoden
- Den Guss des Aluminiums in Blöcke
- Den Walzvorgang
- Die Erzeugung und Bereitstellung der Energie
- Energie (Heizung, Licht) in den Anlagen
- Recycling/ Verwertung

Nicht enthalten:

- Abfälle und deren Behandlung
- Das Recycling von Abfallprodukten
- Aufwand für die Errichtung der Anlagen
- Instandhaltung
- Arbeitskräfte
- Distribution
- Nutzung

Als funktionelle Einheit wird eine Rolle Alufolie betrachtet. Die Abmessungen betragen 10 m Länge mit einer Breite von 29,5 cm. Die Dicke beträgt 10  $\mu\text{m}$ . Bei einer Dichte von 2,6989  $\text{g}/\text{cm}^3$  ergibt dies 79,6 g Aluminium. Etwaige Legierungsbestandteile werden vernachlässigt.

Der **geographische Erfassungsbereich** des Bauxitabbaus umfasst mehrere Gebiete auf der ganzen Welt, da von einem Importmix ausgegangen wird. Die Herstellung der Tonerde und die Elektrolyse erfolgt in Nordamerika (Kanada, USA). Die Erzeugung der elektrischen Energie bezieht sich auf den jeweils landestypischen Energiemix.

Die zeitliche Einordnung bezieht sich auf das Jahr 2010, da die Datengrundlage auf dieses Jahr bezogen ist. Einige Daten weichen etwas von dem Referenzjahr ab, jedoch ergeben sich daraus keine bemerkenswerten Verzerrungen.

Um den Untersuchungsrahmen nicht zu sprengen, müssen einige Annahmen getroffen werden. Dies betrifft insbesondere Vorprozesse, wie beispielsweise die Herstellung von Hilfsstoffen oder Stoffströme die vernachlässigbar klein sind. Bei den zur Verfügung stehenden Datensätzen, insbesondere der zur Herstellung des Aluminiums aus Bauxit, wurden die Daten bereits aufgearbeitet (The Aluminum Association 2013). Hierbei handelt es sich um gemittelte Werte aus einer Vielzahl von nordamerikanischen Firmen. Die gesammelten Daten wurden dann von „PE International“ aufgearbeitet. Auch der Datensatz für den

Walzprozess wurde bereits angepasst. Eine Ausnahme sind die Probas-Datensätze, welche einer Überprüfung und Bearbeitung unterzogen werden müssen.

### **Allokation:**

Bei der Erstellung des Stoffstrommodells wurde weitgehend versucht Koppelprodukte zu vermeiden, beispielsweise durch das Erweitern der Systemgrenzen. Für die Herstellung von Aluminium lässt sich generell sagen, dass es kaum zu Erzeugung von Koppelprodukten kommt.

### **Abscheidekriterien**

Folgende Abscheidekriterien wurden für den Produktionsprozess angewandt:

- Masse: Alle Stoffströme die weniger als 1 % des Gesamtinputs ausmachen, wurden nicht beachtet.
- Energie: Alle Energieströme die weniger als 1 % des Gesamtenergiebedarfs eines Prozesses ausmachen wurden vernachlässigt.
- Emissionen: Für relevante Schadstoffe, die im Produktionsprozess ausgestoßen werden, wurde von der 1 % Schwelle abgesehen.

Für die Bereitstellung und Erzeugung der Energie wurden keine Abscheidekriterien in Form einer Massenschwelle festgelegt. Es werden alle relevanten Emissionen und Stoffströme miteinbezogen. Ebenso wurde die Vorkette mitbeachtet. Die relevanten Emissionen sind alle Schadstoffe, die zum Treibhauspotenzial, zum Versauerungspotenzial und zum Ozonabbaupotenzial beitragen. Die untersuchten Stoffströme umfassen insbesondere die Energieträger wie Erdöl, Erdgas, Braunkohle und Steinkohle.

### **3.1.3 Methodik**

Die Methodik welche für diese Ökobilanz angewandt wird, entspricht den Vorgaben der ISO 14040 und 14044. Diese beginnt mit der Zieldefinition und der Festlegung des Untersuchungsrahmens (vgl. Kap 3.1). Im Folgenden werden nun die Sachbilanz, welche die Datengrundlage darstellt näher vorgestellt und daraus ein Stoffstrommodell abgeleitet. Anhand dieses Stoffstrommodells werden dann die Umweltauswirkungen mithilfe von Wirkungskategorien ermittelt. Dies betrifft das Treibhauspotenzial, das Versauerungspotenzial, das Ozonabbaupotenzial und den Ressourcenverbrauch. Ein besonderes Augenmerk wird hierbei auf die hohen Energieverbräuche und den Einfluss verschiedener Energieträger bei der Stromerzeugung gelegt. Abschließend werden die gesammelten Ergebnisse diskutiert und bewertet.

## 3.2 Erstellung der Sachbilanz

Im Folgenden werden die Stoffströme der einzelnen Produktionssequenzen bilanziert. Diese sind bereits auf die Funktionelle Einheit (79,6 g Aluminium) bezogen. Die einzelnen Sequenzen umfassen den Abbau des Bauxits, Die Herstellung der Tonerde, Die Herstellung der Anoden (benötigt für die Elektrolyse), den Elektrolysevorgang (Hall-Héroult-Prozess), den Guss, den Walzvorgang und das Recycling. Zusätzlich wird die Bereitstellung der Energie betrachtet und die Aufbereitung des Abwassers (ProBas 2005). In nachfolgender Abbildung sind diese Vorgänge in einem qualitativen Stoffstromdiagramm aufgezeigt.

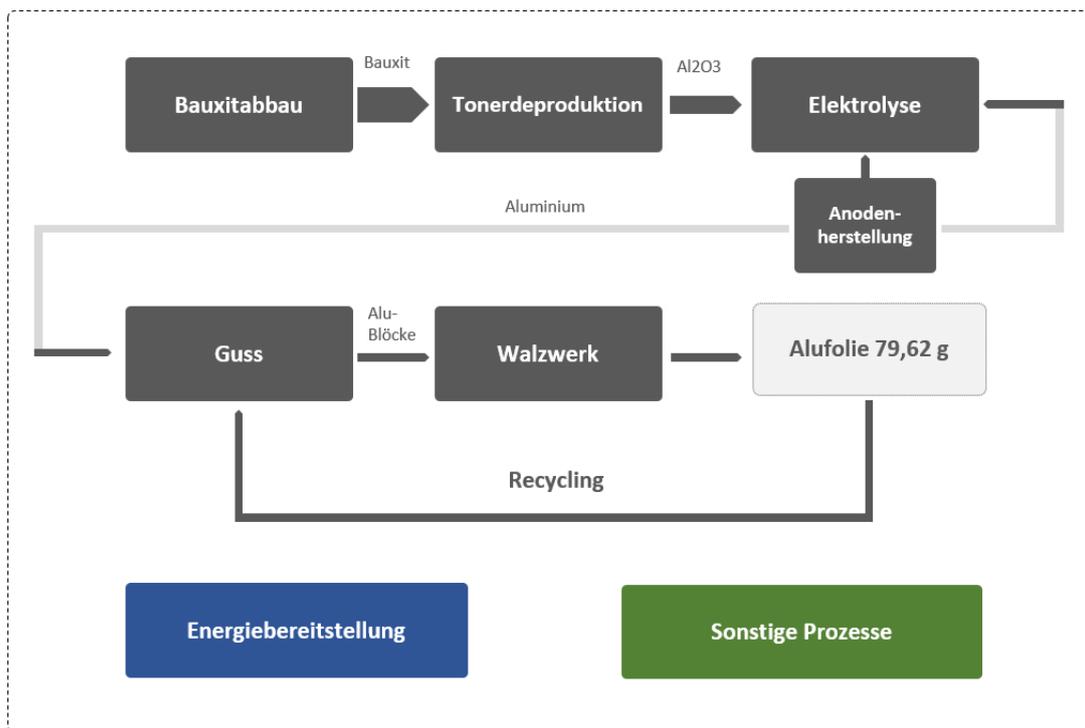


Abbildung 5: qualitatives Stoffstromdiagramm für Aluminiumfolie (eigene Darstellung)

### 3.2.1 Bauxitabbau

Das Bauxiterz ist der Hauptrohstoff für die Aluminiumproduktion. Es wird im Tagebau gewonnen, nachdem der Abraam entfernt wurde. Dieser wird an der Seite gelagert und danach wieder zur Verfüllung verwendet. Je nach Härte des Gesteins, kann Mithilfe von Sprengstoff das Bauxitgestein gelockert werden. Danach wird es gemahlen und gewaschen, um es von Unreinheiten zu befreien. Nachdem es getrocknet wurde kann es dann verschifft oder zur Tonerdefabrik gebracht werden.

Für das Stoffstrommodell wird der Import von Bauxit aus Jamaica (53 %), aus Guinea (26 %) und Brasilien (20,2 %) angenommen. In nachfolgender Tabelle sind die In- und Outputs dieses Prozessschrittes zu

sehen (Es handelt sich dabei lediglich um eine unvollständige Aufführung der In- und Outputs. Die vollständigen Tabellen sind im Anhang ersichtlich). Es werden vor allem Wasser zum waschen und Treibstoff für den Abbau und den Transport des Bauxits aufgewendet. Auf der Outputseite fallen Abraum, Abwasser und Staub an.

Tabelle 1: Bauxitabbau – Sachbilanz

Input				Output			
Haupt				Produkt			
	Bauxiterz	450,53	g		Bauxit	450,50	g
Wasser				Abfall			
	Wasser	226,15	g		Abraum	45,05	g
	Wasser (Meerwasser)	297,33	g		Abwasser	22,52	g
Energie/ Treibstoff							
	Heizöl (Hu)	0,032	MJ				
	Schweröl (Hu)	0,02	MJ				
	elektrische Energie	0,0015	MJ				

### 3.2.2 Tonerdeproduktion

Die Tonerdeproduktion findet in Nordamerika statt und beinhaltet das Mahlen und Zersetzen mit NaOH, den Abscheidevorgang und die Kalzination des Aluminiumoxids. Außerdem werden die Wartung der Anlagen und die Behandlung von Abluft, Abwasser und Abfällen mitbetrachtet.

Der Hauptinput ist auch hier wieder Bauxit. Daneben werden Natriumhydroxid und Kalk benötigt. Bei diesem Prozess fallen neben einigen Luftemissionen wie SO<sub>2</sub> und Quecksilber auch große Mengen Rotschlamm an.

Tabelle 2: Tonerdeproduktion - Sachbilanz

Input				Output			
Haupt				Produkte			
	Bauxit	450,50	g		Aluminiumoxid	156,37	g
Hilfs- und Betriebsstoffe				Abfall			
	Natriumhydroxid	12,34	g		Rotschlamm	211,73	g
	Kalk	6,30	g				
Energie/ Treibstoff							
	fossil	1,55	MJ				
	elektrische Energie	0,059	MJ				

### 3.2.3 Anodenherstellung

Die Anode, welche in dieser Prozessstufe hergestellt werden dienen bei der Schmelzflusselektrolyse als Betriebsstoff, da sie während des Vorganges verbraucht werden. Hauptbestandteil ist Kohlenstoff, welcher an einer Stahlaufhängung befestigt ist. Bei der Herstellung wird Erdölkoks kalziniert, danach gemahlen und mit Steinkohlenteerpech vermischt. Aus dieser Mischung werden nun Blöcke geformt und gekühlt.

Tabelle 3: Anodenherstellung - Sachbilanz

Input			Output		
Haupt			Produkte		
Erdölkoks	23,10	g	Anode	34,63	g
Steinkohle	5,12	g	Abfälle zum Recycling	0,82	g
recycelte Anodenstäbe	7,42	g	Abfälle zur Entsorgung	0,24	g
Kühlwasser	38,09	g			
Energie/ Treibstoff					
fossil	0,123	MJ			
Strom	0,015	MJ			

### 3.2.4 Elektrolyse

Diese Prozesseinheit beginnt mit der Aufbereitung von Aluminiumoxid und endet mit der Abscheidung von geschmolzenem Aluminium. In dieser Bilanz sind die Aufbereitung der Tonerde, die Herstellung von Hilfsstoffen, die Überwachung, die Instandhaltung und die Behandlung von Abluft, Abwasser und Abfällen mitinbegriffen.

Tabelle 4: Elektrolyse - Sachbilanz

Input			Output		
Haupt			Produkte		
Aluminiumoxid	156,37	g	Aluminium	80,81	g
Kryolit	1,26	g	Abfälle zum Recycling	241	g
Anode	34,63	g	Anodenreste	0,81	g
Kühlwasser	314,35	g	Abfälle zur Entsorgung	115	g
Energie/ Treibstoff					
Strom	4,39	MJ			

### 3.2.5 Guss

Das geschmolzene Aluminium aus der Elektrolyse wird in diesem Verfahrensschritt weiterverarbeitet und gegossen. Zu Beginn wird es in Halteöfen überführt, wo es je nach Anforderung mit Legierungselementen versehen wird. Um das Aluminium von Unreinheiten zu befreien wird es mit verschiedenen Gasen gefluxt. Das heißt es werden beispielsweise Stickstoff oder Chlor eingeblasen um Partikel aufzuschwemmen und den Gasanteil in der Schmelze zu reduzieren. Anschließend wird das Aluminium in verschiedenste Formen gegossen.

In dieser Prozesseinheit wird die Vorbehandlung des Metalls, das interne Recycling von Prozessschrotten, die Metallbehandlung, der Guss, die Verpackung, die Instandhaltung und die Behandlung von Abluft, Abwasser und Abfällen miteinbegriffen.

Tabelle 5: Guss - Sachbilanz

Inputs				Output			
Haupt				Produkte			
Aluminium	80,81	g		Aluminiumblöcke	80,81	g	
Legierungen	1,58	g		Abfälle zum Recycling			
Kühlwasser	282,03	g		Schlacke	1,70	g	
Energie/ Treibstoff							
Strom	0,019	MJ					
fossil	0,074	MJ					

### 3.2.6 Walzwerk

In dieser Prozesseinheit wird das gegossene Aluminium, in Form von 20 t Blöcken gewalzt. Das Endprodukt ist dann eine 10 µm dicke Folie. Zu Beginn wird die Oberfläche des Blockes gefräst um sie zu glätten. Danach wird dieser auf ca. 500 °C erhitzt und heiß gewalzt bis er eine Dicke von 2 – 5 mm erreicht. Anschließend beginnt der Kaltwalzprozess bis die gewünschte Dicke erreicht ist.

In dieser Prozesseinheit wird die Vorbehandlung des Metalls, das interne Recycling von Prozessschrotten, der Walzprozess, die Verpackung, der Transport, die Instandhaltung und die Behandlung von Abluft, Abwasser und Abfällen miteinbegriffen.

Tabelle 6: Walzwerk - Sachbilanz

Input				Output			
Haupt				Produkte			
Aluminium	80,81	g		Aluminiumfolie	79,62	g	
Hilfs- und Betriebsstoffe				Abfall zum Recycling			
Verpackung	20,93	g		Abfälle zur Entsorgung	0,79		
Energie/ Treibstoff							
fossil	0,397	MJ			0,63	g	
elektrische Energie	0,24	MJ					

### 3.2.7 Recycling

Aufgrund mangelnder Daten wird die Nutzung und Sammlung sowie Aufbereitung für die Herstellung von Sekundäraluminium nicht betrachtet. Erst die Produktion des Recyclingaluminiums wird wieder berücksichtigt. Als Datengrundlage dient ein Prozess von ProBas (ProBas 2004). Es wird davon ausgegangen, dass die gesammelten Abfälle zusammen mit Prozessschrotten und Altschrotten wieder eingeschmolzen werden. Da Probas keine Prozessabläufe und konkreten Stoffströme bereitstellt, können nur Angaben zu den Energie und Ressourcenverbräuche im allgemeinen gemacht werden. Diese werden im Kap. 3.4 näher dargestellt. Außerdem ist zu erwähnen, dass beim Recycling ein anderer Strommix verwendet wird.

### 3.2.8 Energiebereitstellung

#### Strom Mix

Elektrizität ist insbesondere für den Prozess der Elektrolyse ein enorm großer Energiestrom. Um die Umweltauswirkungen gering zu halten empfiehlt es sich daher Erneuerbare Energien als Grundlage zu wählen. Bei der Erzeugung von Elektrizität kommt es immer zu großen Verlusten bei der Umwandlung und Verteilung, wodurch die Emissionen im Vergleich zu anderen Energieformen noch immenser ausfallen. Um aufzuzeigen, welchen Einfluss die Wahl der Energieträger hat, werden zwei Szenarien betrachtet. Als Basisszenario wird von einem typischen Strommix der USA ausgegangen (ProBas 2010b). Dieser setzt sich wie folgt zusammen:

- Kohle 50,67%
- Atom 20,40%
- Gas 18,71%

- Wasser 5,61%
- Müll 1,87%
- Schweröl 1,56%
- Wind 0,70%
- Geothermie 0,40%

Als Alternativszenario wird von einem norwegischen Strommix ausgegangen (ProBas 2010a). Norwegen versorgt sich fast ausschließlich mit Wasserkraft, was sich insbesondere positiv auf die Ressourcenschonung und die Emissionen auswirkt. Dieser Strommix setzt sich wie folgt zusammen:

- Wasser 93,40 %
- Gas 5,50 %
- Müll 1,10 %

Es wird davon ausgegangen, dass der gleiche Strommix für den gesamten Produktionsprozess eingesetzt wird. Alle Stoff- und Energieströme werden inklusive der Vorkette betrachtet.

Tabelle 7: Stromverbrauch

	Bauxit-abbau	Tonerdeproduktion	Anodenerstellung	Elektrolyse	Guss	Walzwerk	Gesamt
Strom [kJ]	1,49	59,78	15,49	4.396,13	19,68	247,10	4.739,68
Strom [Wh]	0,41	16,61	4,30	1.221,15	5,47	68,64	1.316,58

### Andere Energieträger

Im Produktionsprozess werden neben der Elektrizität eine Vielzahl anderer fossiler Energieträger eingesetzt. Diese dienen vor allem dem Transport oder der Erzeugung von Wärme. Auch hier werden Verbrennungsprozesse von Probas als Datengrundlage verwendet (ProBas 2010c, 2000, 2010d). Die Betrachtung schließt ebenso die Vorprozesse ein.

Tabelle 8: Fossile Energieträger als direkter Input (Endenergie)

	Bauxit-abbau	Tonerdeherstellung	Anodenerstellung	Elektrolyse	Guss	Walzwerk	Gesamt
Erdgas [m³]		32,26	1,84		1,72	8,73	44,55
Heizöl [kg]	0,76	0,01	0,21		0,0001		0,98
Schweröl [kg]	0,50	6,85	1,21		0,25	2,16	10,97
Steinkohle [kg]		4,20					4,20

### 3.3 Stoffstromdiagramm

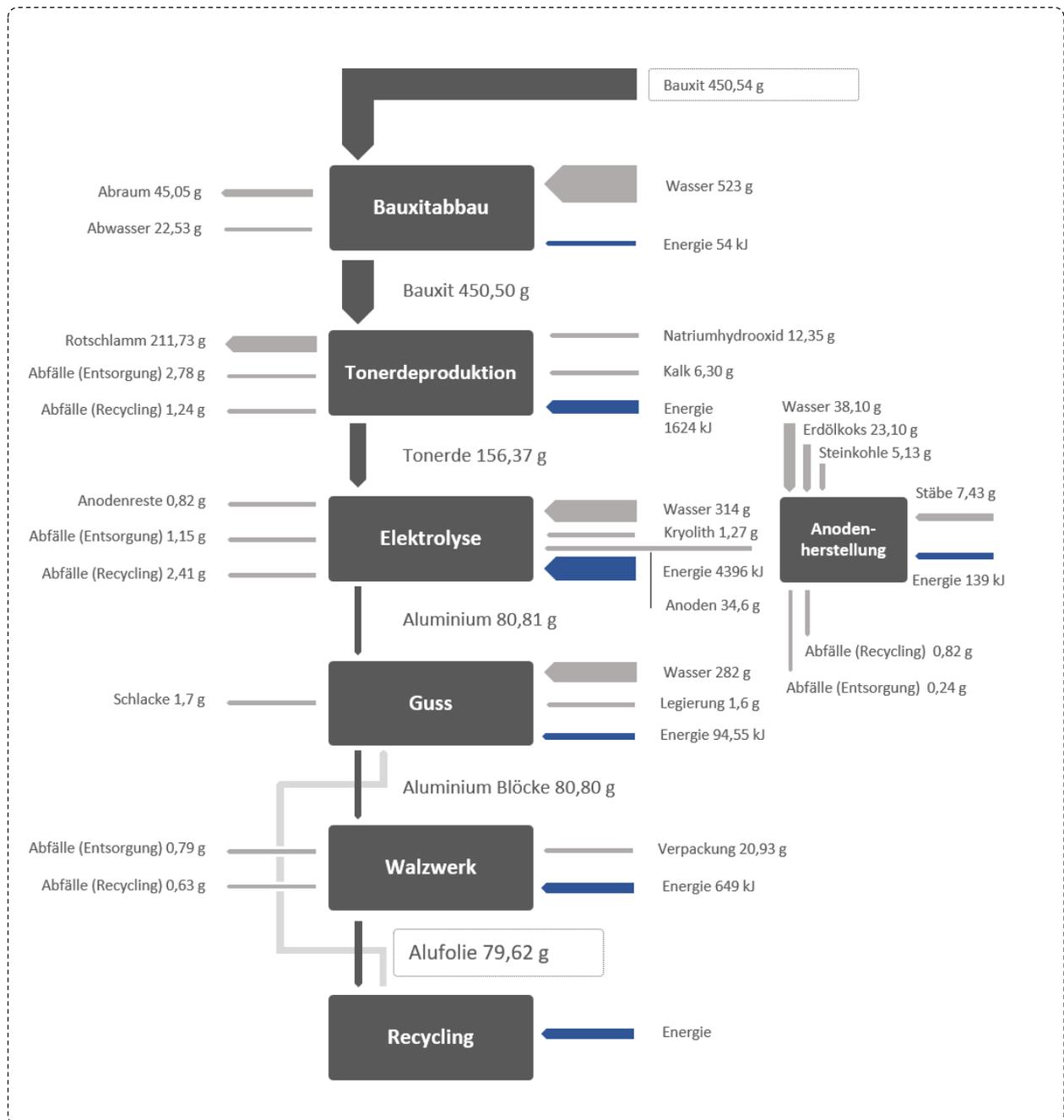


Abbildung 6: Quantitatives Stoffstromdiagramm

### 3.4 Wirkungsabschätzung

#### 3.4.1 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der Kumulierte Energieaufwand ist eine Maßzahl für den gesamten Aufwand an Energieressourcen, die Primärenergie die zu Bereitstellung eines Produktes oder auch Energieträgers notwendig ist (ProBas 2017). Dabei werden ebenso alle Vorketten mitbetrachtet, dass heißt alle Energiemengen die beispielweise für die Herstellung von Hilfsstoffen oder auch für die Bereitstellung der Energie aufgewendet werden.

In nachfolgender Abbildung sind der KEA für beide Szenarien aufgeführt. Dabei sind alle Prozesseinheiten unterschiedlich eingefärbt und nach ihrer Art der Energie einzeln aufgeführt.

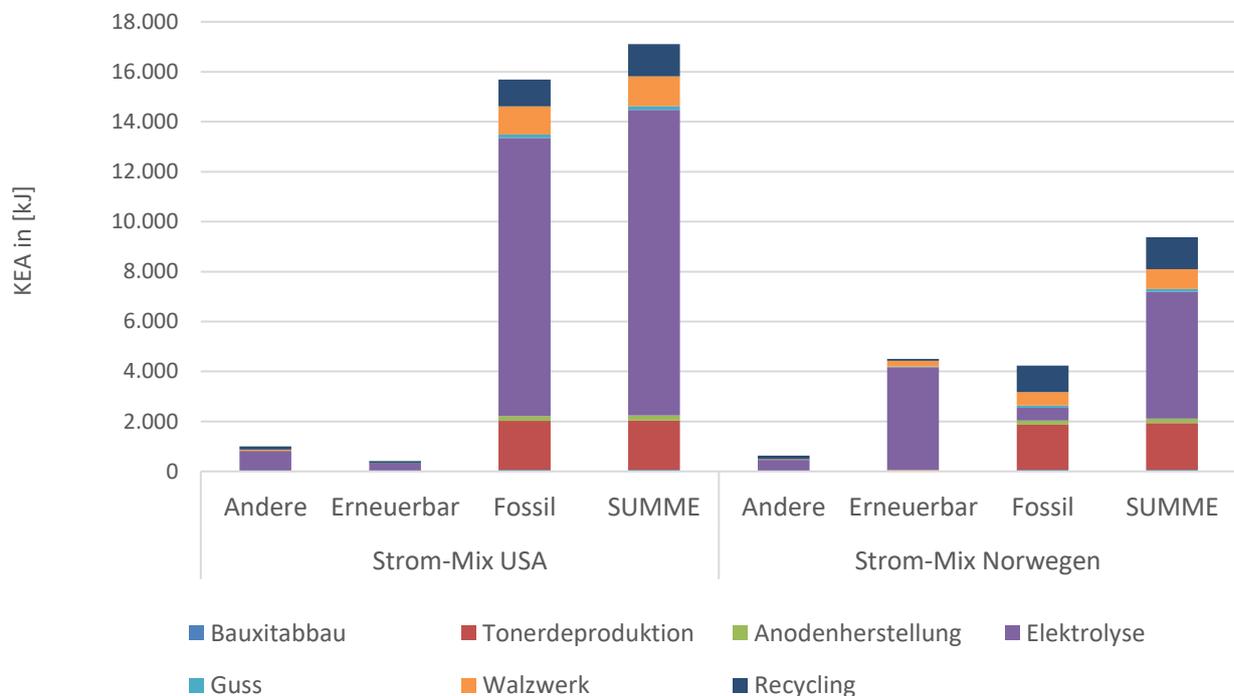


Abbildung 7: Kumulierter Energieaufwand

Es ist gut zu erkennen, dass die Herstellung mit dem Strom-Mix der USA deutlich höhere Verbräuche aufzeigt. Ebenso macht die Elektrolyse einen Großteil am gesamten KEA aus. Der Unterschied zeigt sich gerade in diesem Prozessschritt, da nur Elektrizität als Energie eingesetzt wird. Denn insbesondere wenn diese mithilfe von fossilen Energieträgern erzeugt wird, liegt der KEA im Verhältnis zur tatsächlich genutzten Endenergie deutlich höher. Dies liegt insbesondere an der Bereitstellung und den Umwandlungsverlusten bei der Erzeugung. Wohingegen die Wasserkraft, welche fast ausschließlich beim Norwegischen Strom-Mix eingesetzt wird keine Bereitstellung von Energieträgern benötigt.

### 3.4.2 CO<sub>2</sub> Emissionen

CO<sub>2</sub> ist das bekannteste Treibhausgas und trägt erheblich zur Klimaerwärmung bei. Dieses Gas wird vor allem bei der Verbrennung fossiler Energieträger frei und wird meist in kg CO<sub>2</sub> angegeben. Die Bilanzierung für jeden Prozessschritt ist in Abbildung 8 dargestellt. Der Orangene Balken zeigt die Emissionen, welche direkt durch die Produktion entstehen. Dies betrifft lediglich die Elektrolyse, da bei diesem Vorgang der Sauerstoff mit den kohlenstoffhaltigen Anoden reagiert.

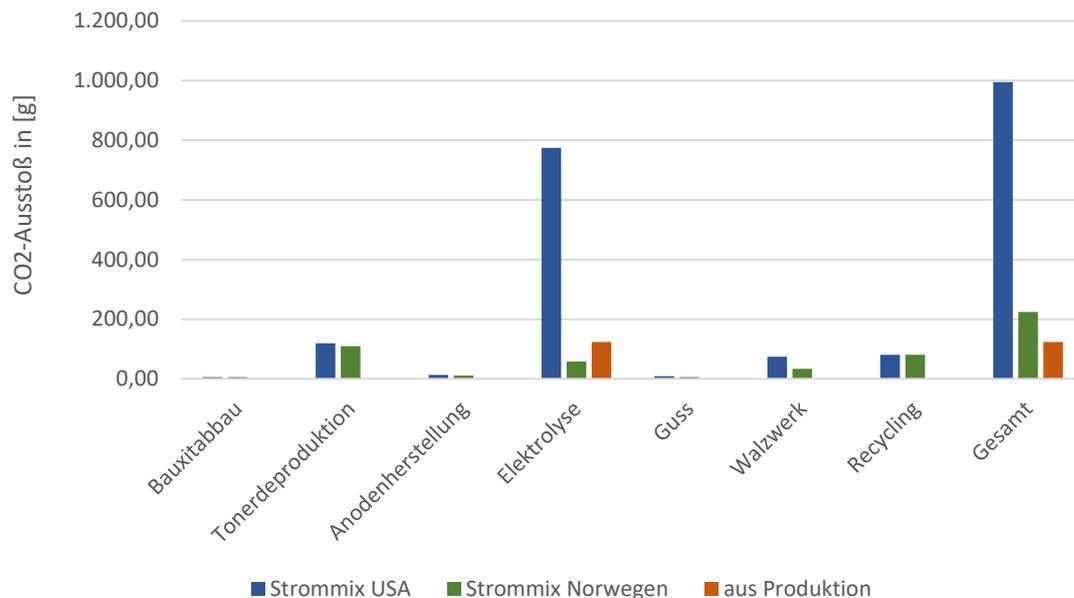


Abbildung 8: CO<sub>2</sub> Emissionen

Auch hier zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Strom-mix's. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass der Norwegische Strom fast ausschließlich auf CO<sub>2</sub> neutraler Wasserkraft basiert. Wohingegen der Strom aus den USA hauptsächlich Kohle und Erdgas einsetzt.

### 3.4.3 CO<sub>2</sub>-Äquivalente

Die CO<sub>2</sub>-Äquivalente stellen die Aggregation aller Treibhausgase nach ihrem Treibhausgaspotenzial dar. Beispielsweise besitzt CO<sub>2</sub> als Basiswert den Faktor eins, wohingegen NO<sub>2</sub> deutlich klimaschädlicher ist und mit dem Äquivalenzfaktor 310 beaufschlagt wird. In Abbildung 9 sind die Ergebnisse der Auswertung, analog zu Abbildung 8 aufgetragen.

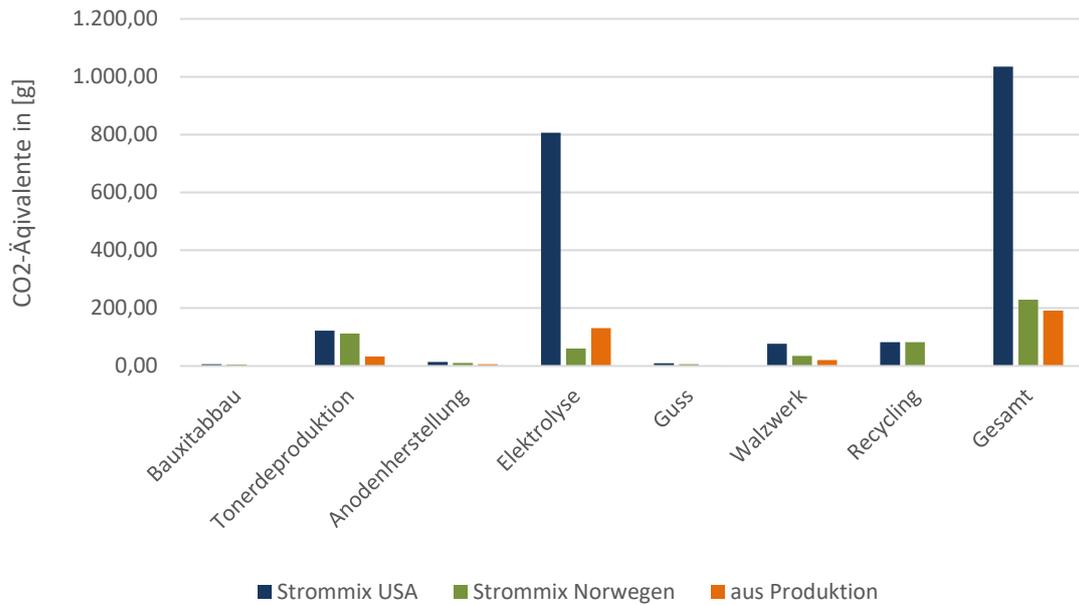


Abbildung 9: CO2-Äquivalente

Im Vergleich zur vorherigen Abbildung zeigt sich deutlich, dass CO<sub>2</sub> den mit Abstand größten Einfluss hat.

### 3.4.4 Ressourcenverbrauch

Auch der Ressourcenverbrauch spielt eine wichtige Rolle für die Erhaltung unserer Lebensgrundlage. Dazu ist es wichtig umweltgerecht zu wirtschaften und Ressourcen zu schonen. Um diesen Verbrauch zu bewerten wird üblicherweise die Knappheit der Ressource als Kriterium herangezogen. Als Maßstab dazu dienen die Faktoren Verbrauch, eventuelle Neubildung und die Reserven (Klöpffer und Grahl 2009). Diese werden zueinander in Beziehung gesetzt und als Rohölreserveäquivalente dargestellt. Beispielsweise hat Braunkohle ein niedrigeres Äquivalent als Erdöl (Faktor 1), da die statische Reichweite deutlich höher ist (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Rohölreserveäquivalente<sup>4</sup>

	kJ/kg	kg Rohöl-Äq./kg
Braunkohle	200	0,0409
Erdgas	60	0,5212
Erdöl	42	1
Steinkohle	160	0,1836

<sup>4</sup> Klöpffer und Grahl 2009

In Abbildung 10 sind die Ressourcenverbräuche für beide Szenarien aufgetragen.

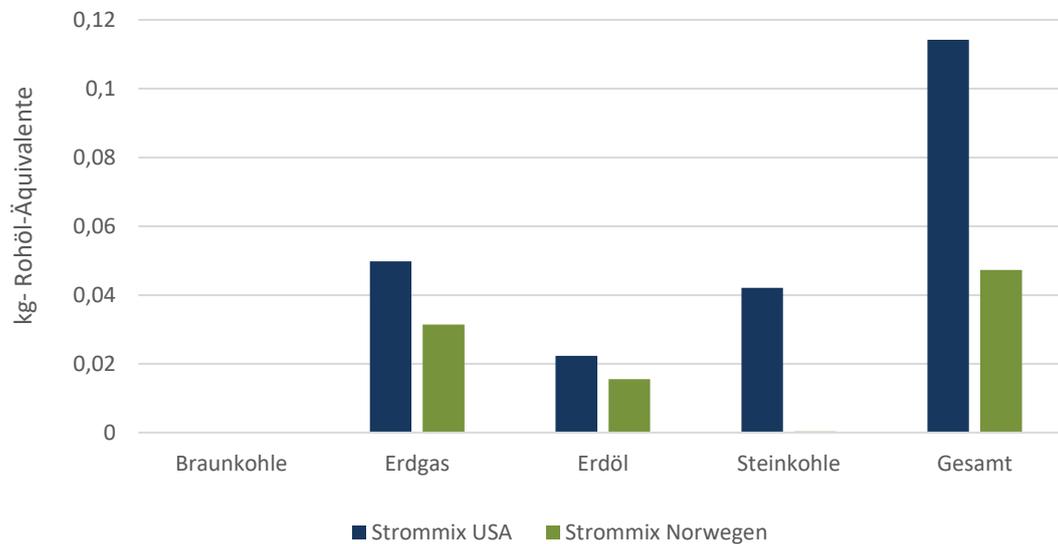


Abbildung 10: Ressourcenverbrauch

Es ist auch hier gut zu erkennen, dass die Ressourcenverbräuche für den amerikanischen Strom-Mix mehr als doppelt so hoch sind. Vor allem die Verbräuche an Steinkohle sind um den Faktor 130 größer, was auf die Stromerzeugung zurückzuführen ist.

### 3.4.5 Versauerungspotenzial

Säurebildende Abgase fördern die Versauerung von terrestrischen und aquatischen Systemen. Die Bestimmung des Versauerungspotenzials erfolgt durch Umrechnung auf  $\text{SO}_2$ -Äquivalente. In nachfolgender Abbildung sind diese Emissionen aggregiert und für jeden Prozessschritt ersichtlich. Auch hier ist wieder ein großer Unterschied zwischen beiden Szenarien feststellbar. Durch die Verwendung des norwegischen Strom-mixes kommt es zu einer Verringerung um fast 70 %.

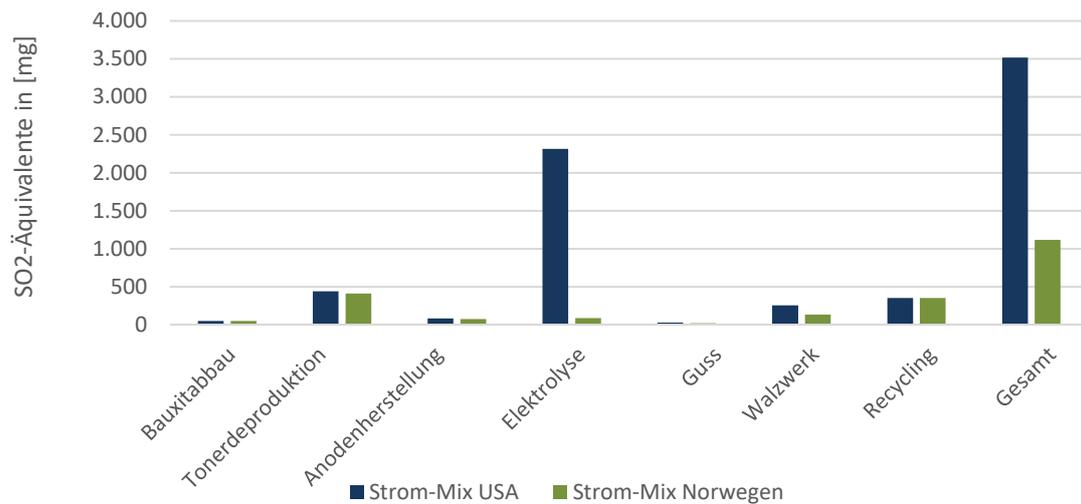


Abbildung 11: Versauerungspotenzial

### 3.4.6 Ozonbildungspotenzial

Sommersmog oder Photo-Smog ist das Ergebnis einer Erhöhung der Ozonbildung unter Lichteinfluss in Bodennähe. Einige Substanzen aus der Gruppe der flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen sind beim Vorhandensein von Sonnenlicht oder weiterer Startersubstanzen (z.B.  $\text{NO}_x$ ) für die Bildung von bodennahem Ozon verantwortlich. Die „tropospheric ozone precursor potential equivalents“ = troposphärische Ozon- Vorläufer-Äquivalente sind der Quantitative Ausdruck für das Ozonbildungspotenzial und werden durch Verschiedene Luftschadstoffe wiedergegeben (ProBas 2017). Je größer die Menge an troposphärischen Ozon-Vorläufer-Äquivalenten, umso höher ist die Gefahr von Sommersmog.

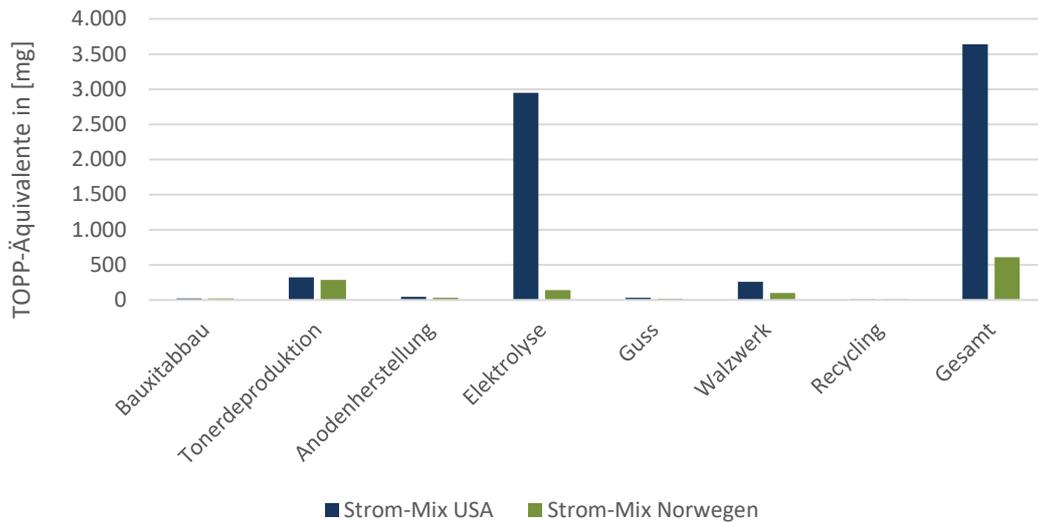


Abbildung 12: Ozonbildungspotenzial

Bei diesem Vergleich fällt der Unterschied wohl am größten aus. Bei der Verwendung norwegischen Stromes liegt das Ozonbildungspotenzial um den Faktor sieben unter dem anderen Szenario.

### 3.5 Diskussion und Verbesserungspotenziale

Es wurde deutlich gezeigt, dass die Herstellung von Aluminium ein energieintensiver Prozess ist und daher die Wahl der Energieversorgung einen immensen Einfluss auf die Umweltauswirkungen hat. Insbesondere, wenn man sich vor Augen führt, dass bei der Verwendung fossiler Energieträger der Aufwand für die Bereitstellung sehr hoch ist und somit der Verbrauch noch weiter steigt. Es ist daher wichtig nicht die Endenergie zu betrachten, sondern den KEA. Hinzukommen die umweltschädlichen Emissionen bei der Verbrennung. Es wäre daher ratsam den Prozess der Schmelzflusselektrolyse in einem Land wie Norwegen durchzuführen, denn selbst wenn man die Verbräuche und Emissionen für den Transport hinzurechnet, überschreiten diese nicht einmal im Ansatz die Verbräuche bei der Produktion in Amerika.

Ein weiterer Punkt der in der Ökobilanz nicht betrachtet wurde ist die Problematik des Rotschlammes, welcher bei der Tonerdeherstellung in großem Maße anfällt. Bis heute wird dieser in großen Becken gelagert und wird nicht Verwertet. Insbesondere in weniger entwickelten Ländern wird der Rotschlamm einfach in Flüsse geleitet, was verheerende Folgen für die Ökosysteme hat. Denn dieser besteht aus ätzender Natronlauge und Schwermetallen. Zusätzlich können durch Verschiebung des pH-Wertes Schwermetalle ausgewaschen werden und ins Grundwasser gelangen. Daher wäre eine vollständige Verwertung sinnvoll. Im Sinne des Urban minings könnte dieser Schlamm als Ressourcenquelle genutzt werden, da er neben Aluminium und Eisen eine weitere Reihe an Metallen enthält.

Auch im Sinne der Kreislaufwirtschaft gibt es noch weiteres Verbesserungspotenzial. Denn ein großer Teil des Aluminiums landet in der MVA. Hier ist es zwar möglich das Aluminium aus den Schlacken zu gewinnen, jedoch ist der Energieaufwand hierfür relativ hoch. Sinnvoll wäre eine Vorsortierung wie im Dualen System (Grüner Punkt).

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass Aluminium ein vielseitig einsetzbares Metall ist und aus unserer modernen Gesellschaft nicht wegzudenken ist. Es besitzt sehr gute Eigenschaften und steht uns im großen Maße zur Verfügung. Dennoch sollte darauf hingearbeitet werden die Recyclingrate weiter zu erhöhen, um den Energieintensiven Prozess der Primäraluminiumherstellung zu vermeiden. Auch die gesundheitlichen Aspekte durch die Nutzung von Aluminium sollten nicht vernachlässigt werden. Im Hinblick auf Alufolie können sich Partikel durch Säure oder andere Prozesse ablösen und in den Organismus gelangen. Aus diesem Grund wäre die Verwendung von Butterbrotpapier oder ähnlichen Alternativen zu empfehlen.

## 4 Literaturverzeichnis

- Arnold, Bozena (2013): Werkstofftechnik für Wirtschaftsingenieure. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-36591-1>.
- der wertstoffblog (2017): Aluminiumfolie – das Wichtigste zu Klimabilanz, Gesundheitsrisiko und Recyclingpotenzial - Wertstoffblog. Hg. v. INTERENA GmbH. Online verfügbar unter <http://wertstoffblog.de/2015/11/24/aluminiumfolie-das-wichtigste-zu-klimabilanz-gesundheitsrisiko-und-recycling-potential-des-aluminiums-von-der-rolle/>, zuletzt geprüft am 19.04.2017.
- GDA (2017): Verpackungen. Hg. v. Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. Online verfügbar unter <http://www.aluinfo.de/verpackungen.html>, zuletzt aktualisiert am 17.06.2017, zuletzt geprüft am 17.06.2017.
- Helsinki University of Technologie (2017): The application of LCA in the aluminium industry. CASE STUDY for LCA in aluminium industry. Hg. v. Helsinki University of Technologie. Online verfügbar unter [http://emrtk.uni-miskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/kornyezetvedelem/3\\_konzultacio\\_elemei/1/sec13\\_2.htm](http://emrtk.uni-miskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/kornyezetvedelem/3_konzultacio_elemei/1/sec13_2.htm), zuletzt aktualisiert am 30.04.2004, zuletzt geprüft am 09.07.2017.
- Klöpffer, Walter; Grahl, Birgit (2009): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: WILEY-VCH. Online verfügbar unter <http://lib.myilibrary.com?id=213988>.
- Kornelíusdóttir, Anna Margrét (2014): A cradle-to-gate life cycle assessment of primary aluminium production at Norðurál. University of Iceland. Faculty of Industrial Engineering, Mechanical Engineering and Computer Science, zuletzt geprüft am 23.04.2017.
- Maschinenbau-Wissen.de (2017): Sekundäraluminium - Recycling von Aluminium. Hg. v. Maschinenbau-Wissen.de. Online verfügbar unter <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/aluminium/73-sekundaeraluminium>, zuletzt geprüft am 26.04.2017.
- Ostermann, Friedrich (2014): Anwendungstechnologie Aluminium. 2., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch), zuletzt geprüft am 21.04.2017.
- ProBas (2000): Öl-leicht-Kessel-US-2000. leichtes Heizöl zu Wärme. Hg. v. umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B930F3132-7912-11D4-880B-0080C8426C99%7D>, zuletzt geprüft am 10.07.2017.

- ProBas (2004): Aluminium, sekundär. Hg. v. umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={3492B409-0B8D-4CF1-B421-66547769222B}>, zuletzt geprüft am 10.07.2017.
- ProBas (2005): Abwasser-Reinigung-DE-2005. Abwasserreinigung. Hg. v. umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B4AA00B29-8EB5-4695-8CE9-FF98139D48F2%7D>, zuletzt geprüft am 10.07.2017.
- ProBas (2010a): El-KW-Park-NO-2010. Strom-Mix-Norwegen. Hg. v. umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B110AA8E1-4742-4551-BECE-02607270A04F%7D>, zuletzt geprüft am 10.07.2017.
- ProBas (2010b): El-KW-Park-US-2010. Strom-Mix-USA. Hg. v. umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={0812EA26-0844-41F9-B805-97998E0BE977}>, zuletzt geprüft am 10.07.2017.
- ProBas (2010c): Gas-Kessel-US-2010. Erdgas zu Wärme. Hg. v. umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7BFA16309C-4091-4A28-80C2-0815B34CA12A%7D>, zuletzt geprüft am 10.07.2017.
- ProBas (2010d): Öl-schwer-Kessel-US-2010. Schweröl zu Wärme. Hg. v. umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B69351770-A874-433E-B583-F75CF337BC2B%7D>, zuletzt geprüft am 10.07.2017.
- ProBas (2017): ProBas - Glossar. Hg. v. umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/glossar.php#K>, zuletzt geprüft am 09.07.2017.
- Statista (2017a): Minenproduktion von Bauxit ausgewählter Länder 2016 | Statistik. Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38533/umfrage/minenproduktion-von-bauxit-ausgewaehlter-laender/>, zuletzt geprüft am 21.04.2017.
- Statista (2017b): Recyclingquote von Aluminiumverpackungen in Deutschland bis 2014 | Statistik. Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156542/umfrage/recyclingquote-von-aluminiumverpackungen-in-deutschland-seit-1991/>, zuletzt geprüft am 19.06.2017.

- Statista (2017c): Reserven von Bauxit in ausgewählten Ländern 2016 | Statistik. Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/176832/umfrage/reserven-von-bauxit-nach-laendern/>, zuletzt geprüft am 21.04.2017.
- Statista (2017d): Verwendung von Aluminium nach Sektoren in Deutschland 2015 | Statistik. Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/239677/umfrage/verwendung-von-aluminium-nach-industriezweigen/>, zuletzt geprüft am 17.06.2017.
- The Aluminum Association (2013): The Environmental Footprint of Semi-Finished Aluminum Products in North America. A Life Cycle Assessment Report. Online verfügbar unter [http://www.aluminum.org/sites/default/files/LCA\\_Report\\_Aluminum\\_Association\\_12\\_13.pdf](http://www.aluminum.org/sites/default/files/LCA_Report_Aluminum_Association_12_13.pdf), zuletzt geprüft am 09.07.2017.
- umweltbundesamt (2017): ProBas. Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme. Hg. v. umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>, zuletzt geprüft am 09.07.2017.
- Wilts, Henning; Lucas, Rainer; Gries, Nadja; Zirngiebl, Marthe (2014): Recycling in Deutschland – Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze. Studie im Auftrag der KfW Bankengruppe. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, zuletzt geprüft am 19.06.2017.

# 5 Anhang

## 5.1.1 Bauxitabbau

Tabelle 10: Bauxitabbau – Sachbilanz ausführlich

Input				Output			
Haupt				Produkt			
	Bauxiterz	450,53	g		Bauxit	450,50	g
Wasser				Abfall			
	Wasser	226,15	g		Abraum	45,05	g
	Wasser (Meerwasser)	297,33	g		gefährlicher Abfall	0,015	g
Energie/ Treibstoff					nicht gefährlicher Abfall	0,0135	g
	Heizöl (Hu)	0,032	MJ	Emissionen in Wasser			
	Schweröl (Hu)	0,02	MJ		Abwasser	22,52	g
	elektrische Energie	0,0015	MJ	Emissionen in Luft			
					Staub	0,077	g
					Wasserdampf	202,73	g

## 5.1.2 Tonerdeproduktion

Tabelle 11: Tonerdeproduktion - Sachbilanz ausführlich

Input				Output			
Haupt				Produkte			
	Bauxit	450,50	g		Aluminiumoxid	156,37	g
Hilfs- und Betriebsstoffe				Abfall zum Recycling			
	Natriumhydroxid	12,34	g		Bauxitreste	3,60E-01	g
	Kalk	6,30	g		Andere	0,87	g
Energie/ Treibstoff				Abfall zur Entsorgung			
	Kohle	0,125	MJ		Rotschlamm	211,73	g
	Heizöl (Hu)	0,000256	MJ		gefährlicher Abfall	1,45	g
	Schweröl (Hu)	0,27	MJ		nicht gefährlicher Abfall	1,33	g
	elektrische Energie	0,059	MJ	Emissionen in Luft			
	Dampf	0,20	MJ		Partikel	0,09	g
	Erdgas	0,95	MJ		SO <sub>2</sub>	0,38	g
					NO <sub>x</sub>	0,10	g
					Quecksilber (+II)	3,12E-05	g
					Wasserdampf	187,64	g

### 5.1.3 Anodenherstellung

Tabelle 12: Anodenherstellung - Sachbilanz ausführlich

Input			Output		
Haupt			Produkte		
Erdölkoks	23,10	g	Anode	34,63	g
Steinkohle	5,12	g	Abfälle zum Recycling		
recycelte Anodenstäbe	7,42	g	feuerfestes Material	0,17	g
feuerfestes Material	0,25	g	Stahl	0,067	g
Stahl	0,21	g	Kohlereste	0,59	g
Kühlwasser	38,09	g	Emissionen in Luft		
Energie/ Treibstoff			Partikel	0,0082	g
Strom	0,015	MJ	SO <sub>2</sub>	0,105	g
leichtes Heizöl	0,0089	MJ	Nox	0,019	g
Schweröl	0,048	MJ	Flourid gasförmig	0,00026	g
Erdgas	0,066	MJ	Flourid partikulär	7,6E-05	g
	139,67		Benzo(a)pyren	7,6E-06	g
			PAK	0,0017	g
			Emissionen in Wasser		
			Abwasser	34,28	g
			Öl	0,00027	g
			PAK	3,4E-07	g
			Feststoffe	0,0012	g
			Abfälle zur Entsorgung		
			Wäscherschlamm	0,012	g
			feuerfestes Material	0,083	g
			nicht gefährlicher Abfall	0,045	g
			gefährlicher Abfall	0,096	g

### 5.1.4 Elektrolyse

Tabelle 13: Elektrolyse - Sachbilanz ausführlich

Input				Output			
Haupt				Produkte			
Aluminiumoxid	156,37		g	Aluminium	80,81		g
Kryolit	1,26		g	Abfälle zum Recycling			
Anode	34,63		g	Aluminiumoxid	0,34		g
Kathode	0,48		g	feuerfestes Material	0,58		g
Stahl	0,30		g	Anodenreste	0,81		g
Kühlwasser	314,35		g	Kohlenstoff	0,37		g
Energie/ Treibstoff				Stahlschrott	0,30		g
Strom	4,39		MJ	Emissionen in Luft			
				CO2	123,96		g
				Partikel	0,15		g
				Flourid partikulär	0,042		g
				Flourid gasförmig	0,040		g
				Benzo(a)pyren	8,88E-06		g
				PAK	0,00071		g
				SO2	1,23		g
				NOx	0,021		g
				Tetraflourmethan	0,0062		g
				Hexafluorethan	0,00085		g
				Emissionen in Wasser			
				Abwasser	294,96		g
				Fluoride	0,0026		g
				Öl	0,00029		g
				Feststoffe	0,040		g
				PAK	5,89E-07		g
				Abfälle zur Entsorgung			
				feuerfestes Material	0,63		g
				Wäscherschlamm	0,47		g

## 5.1.5 Guss

Tabelle 14: Guss - Sachbilanz ausführlich

Inputs				Output			
Haupt				Produkte			
Alumium	80,81	g		Aluminiumblöcke	80,81	g	
Legierungen	1,58	g		Abfälle zum Recycling			
Chlor	0,0029	g		Schlacke	1,70	g	
Stickstoff Gas	0,017	g		Filterstaub	0,12	g	
Kühlwasser	282,03	g		Abfälle zur Entsorgung			
Energie/ Treibstoff				Filterstaub	0,037	g	
Strom	0,019	MJ		Anderer Industrieabfall	0,045	g	
leichtes Heizöl	0,0027	MJ		feuerfestes Material	0,096	g	
Schweröl	0,0099	MJ		Emissionen in Luft			
Erdgas	0,061	MJ		Particulates	0,0029	g	
Propan	0,000292	MJ		ChlorWasserstoff	0,0019	g	
				Nox	0,0058	g	
				Sox	0,0088	g	
				Emissionen in Wasser			
				Abwasser	263,44	g	
				Öl	0,0029	g	
				Feststoffe	0,011	g	

### 5.1.6 Walzwerk

Tabelle 15: Walzwerk - Sachbilanz ausführlich

Input				Output			
Haupt				Produkte			
Aluminium	80,81	g		Aluminiumfolie	79,62	g	
Hilfs- und Betriebsstoffe				Abfall zum Recycling			
Salz	0,014	g		Eisenschrott	0,18	g	
Chlor	0,017	g		Aluminiumschrott	0,44	g	
Kalk	0,18	g		Abfälle zur Entsorgung			
Argon	0,029	g		Filterstaub	0,79	g	
Verpackung	20,93	g		Emissionen in Luft			
Schmieröl	0,48	g		Staub	0,0039	g	
Energie/ Treibstoff					SO <sub>2</sub>	0,058	g
elektrische Energie	0,24	MJ		NO <sub>X</sub>	0,064	g	
Schwerhöl	0,087	MJ					
Erdgas	0,31	MJ					