Energiewende in der Industrie

Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor

Branchensteckbrief der NE-Metallindustrie

Bericht an:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

von:

Tobias Hübner, FfE
Andrej Guminski, FfE
Elsa Rouyrre, FfE
Serafin von Roon, FfE

in Zusammenarbeit mit:

Navigant Energy Germany GmbH
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
BBG und Partner

Vorhaben: I C 4 – 80 14 38/42; Projekt-Nr. 42/17
Projektnummer: SISDE17915
14.06.2019

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für beiderlei Geschlecht.

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

INHALTSVERZEICHNIS

1. NE-Metallindustrie 1

1.1 Übersicht über die NE-Metallindustrie 2

1.2 Produktionsprozesse in der NE-Metalle Industrie 8

1.1.1 Aluminiumherstellung 9

1.1.2 Kupferherstellung 12

1.1.3 Gießereien für NE-Metalle 16

1.3 Chancen und Herausforderungen durch die Energiewende 18

2. Literaturverzeichnis 20

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BWS	Bruttowertschöpfung
CAGR	Jährliche Wachstumsrate (engl. compound annual growth rate)
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilisation
CO_2	Kohlenstoffdioxid
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetzes
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MW	Megawatt
NACE	System zur Klassifizierung von Wirtschaftszweigen (frz. Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne)
THG	Treibhausgas
TWh	Terawattstunde

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

1. NE-METALLINDUSTRIE

Den Nichteisen-Metallen (NE-Metallen) werden u. a. Aluminium, Kupfer, Edelmetalle, Blei, Zink und Zinn zugeordnet. Nachfolgend werden besonders energie- und emissionsintensive Industrien betrachtet, die die Erzeugung und erste Bearbeitung von NE-Metallen durchführen. Aufgrund der Produktionsmenge, des Energieverbrauchs und der Emissionen sind insbesondere die Aluminium- und die Kupferherstellung relevant. Zudem werden NE-metallverarbeitende Gießereien miteinbezogen.

Tabelle 1-1. Kennzahlen NE-Metallindustrie (2017)[11]

	Aluminium-industrie	Kupfer-industrie	NE-Metall Gießereien
Produktionsstandorte (2017)	115	67	204
Arbeitsplätze (2017)	26.788	16.959	35.014
Bruttowertschöpfung (BWS) (2014)	2,5 Mrd. €	1,6 Mrd. €	2,2 Mrd. €
CAGR BWS (2010–2016)	1,70 %	2,96 %	1,92 %
Jährliche Rohmetallproduktion	1,3 Mio. t[1]	0,73 Mio. t[2]	1,3 Mio. t.[3]
Gesamtenergieverbrauch in TWh (2015)	12,3	1,7	4,2
Stromverbrauch in TWh	8,1	ca. 0,5	1,8
Brennstoffverbrauch in TWh	4,2	1,2	2,4
Erdgasverbrauch in TWh	ca. 2,1	k.A.	2,1
Kohleverbrauch	Anode	k.A.	-
Erdöl (Heizöl) in TWh	ca. 0,16	k.A.	0,1
Gesamtemissionen, Mio. t CO_2e [4]	6,4	ca. 0,6	1,8
Eigenproduktions- & KWK-Anteil	-	-	-[5]

Bei der Aluminiumproduktion wird zwischen der Erzeugung von Primäraluminium und Sekundäraluminium unterschieden.[6] Für die Herstellung von Sekundäraluminium wird rund 95 Prozent weniger Energie benötigt.[7] Auch in der Kupferindustrie ist für die Sekundärproduktion deutlich weniger Energie als für die Primärproduktion erforderlich. Zudem ist durch Recycling, analog zur Aluminiumindustrie, eine alternative Produktionsroute verfügbar, bei der Energiemengen ggü. der Primärroute eingespart werden kann. Bei der Weiterverarbeitung der Metalle in NE-Metallgießereien dominieren ebenfalls Kupfer und Aluminium. NE-Metallgießereiprozesse werden zu 94 Prozent mit Aluminium (88 Prozent) und Kupfer (6 Prozent) durchgeführt.[8] Dabei werden verschiedene Gussarten unabhängig vom NE-Metalltyp eingesetzt.[9] Aus NE-Metallen werden neben Gießereiprodukten Halbzeuge wie Stangen, Rohre oder Drähte hergestellt.

[1] Primär- und Sekundäraluminium.
[2] Raffiniertes Kupfer u. Kupfergusslegierungen.
[3] Guss aus Metallen und Legierungen.
[4] Berechnet aus den spezifischen Emissionen von (*Fleiter/Schlomann/Eichhammer*, 2013) und Produktionsmenge aus (2015 Minerals Yearbook, 2017) sowie (*Wirtschaftsvereinigung Metalle*, 2018).
[5] Mit Ausnahme der jährlichen Produktionsmengen beziehen sich die Daten auf Rohmetall und Halbzeug.
[6] *Bauknecht u. a.* (2016); *Ostermann* (2014).
[7] *Kammer* (2009).
[8] *Lickfett* (2018a); *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018).
[9] *Bosse et al.* (2013).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

1.1 Übersicht über die NE-Metallindustrie

Branche. Die Aluminiumindustrie, mit rund 118 Produktionsstandorten in Deutschland, erwirtschaftete im Jahr 2017 einen Umsatz von gut 14 Mrd. Euro.[10] Damit konnten die Betriebe ihre Umsätze im Bereich der Rohaluminium und Halbzeugfertigung um 9 Prozent gegenüber dem Vorjahr steigern.[11] Im Jahr 2017 wurden etwa 1,3 Mio. t Rohaluminium produziert, wovon gut 58 Prozent der Sekundärproduktion zugeordnet werden können. Die deutsche Primäraluminiumindustrie umfasst zwei Unternehmen, die an vier Standorten produzieren.[12] Zusammengenommen stellten die vier Aluminiumhütten in Deutschland im Jahr 2017 in etwa 550.000 t Primäraluminium her.[13] Die Produktionskapazität lag im Jahr 2017 in etwa bei 625.000 t Primäraluminium.[14] Hieraus resultiert eine Auslastung von ca. 88 Prozent. Neben Primäraluminium wurde durch Recycling im Jahr 2017 zudem Sekundäraluminium in Höhe von etwa 763.000 t produziert.[15] Gegenüber 2016 stieg die Produktion von Hüttenaluminium um gut 0,6 Prozent, während die Recyclingaluminiumproduktion um 5,5 Prozent zulegte.[16] Hauptabnehmer von Aluminium und Aluminiumerzeugnissen sind im Verkehrssektor tätige Industrien, die etwa 50 Prozent des in Deutschland produzierten Aluminiums beziehen.[17] Wichtigste internationale Handelspartner für die deutsche Aluminiumindustrie sind die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union.[18] Der Anteil Deutschlands an der Primär- und Sekundäraluminiumproduktion in der EU im Jahr 2015 betrug etwa 13 Prozent bzw. 15 Prozent.[19]

Die deutsche Kupferindustrie erwirtschaftet einen Umsatz in der Größenordnung der Aluminiumindustrie. Dieser lag im Jahr 2017 bei 15 Mrd. Euro.[20] Hierzu wurden ca. 0,73 Mio. t. raffiniertes Kupfer und Kupfergusslegierungen hergestellt. 45 Prozent des Umsatzes wurden im Jahr 2017 durch Exporte realisiert. Kupfer wird hauptsächlich für Kabel und Elektroprodukte eingesetzt, weitere Abnehmer sind die Bauwirtschaft, die Automobilbranche sowie der Maschinenbau.[21] In den letzten zehn Jahren (2006 – 2016) hat sich die Anzahl der Kupferbetriebe erhöht, die Anzahl der Beschäftigten jedoch reduziert. Bei einer nahezu gleichbleibenden Produktionsmenge in den letzten Jahren werden die Kupferbetriebe folglich tendenziell kleiner. Im Jahr 2010 war Deutschland der größte Kupferproduzent in Europa und steuerte zudem etwa 4 Prozent der weltweiten Produktionsmenge bei.[22]

In Deutschland waren im Jahr 2017 bundesweit 204 Nichteisen-Metallgießereien im Markt tätig, die etwa 35.000 Mitarbeiter beschäftigten.[23] Der Anteil am produzierenden Gewerbe beträgt etwa 1 Prozent, womit die NE-Metallgießereien zu den kleineren deutschen Industriezweigen zählen. Dennoch werden in keinem europäischen Land mehr Gusserzeugnisse produziert als in Deutschland.[24] Im Jahr 2017 wurden insgesamt 1.119.000 t Aluminium, 79.000 t Kupfer, 62.000 t Zink und 18.000 t Magnesium vergossen (nur Gussteile).[25] Über 84 Prozent der Metallgusserzeugnisse werden im Straßenfahrzeugbau verwendet. Damit ist dieser Industriezweig der größte Abnehmer für Gießereiprodukte.[26]

[10] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018).
[11] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018).
[12] *Gruber/Roon/Fattler* (2016).
[13] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018).
[14] *Norsk Hydro ASA* (2017); *TRIMET Aluminium SE* (2015); *Scheben* (2014); *Scheben* (2011).
[15] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018).
[16] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018).
[17] *Wellner/Mählmann/Postler* (2016).
[18] *Wellner/Mählmann/Postler* (2016).
[19] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018); *European Aluminium* (2018a).
[20] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018).
[21] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018).
[22] *Grave u. a.* (2015).
[23] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018).
[24] *Lickfett* (2018b).
[25] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018).
[26] *Lickfett* (2018a).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

Energiebilanz. Zur Herstellung von Primäraluminium wird hauptsächlich elektrische Energie in der Produktion eingesetzt. Der Stromanteil am Gesamtenergieverbrauch beträgt über 90 Prozent.[27] Die elektrische Energie wird hauptsächlich für Schmelzprozesse bei der Aluminiumelektrolyse wie dem Hall-Heroult-Verfahren benötigt (etwa 82 Prozent des Gesamtenergieverbrauchs). Bei der Herstellung von Sekundäraluminium werden hingegen etwa 83 Prozent Brennstoffe und 17 Prozent Strom eingesetzt. Bei den Brennstoffen entfallen gut 93 Prozent auf Erdgas.[28] Diese werden vor allem für das Schmelzen der Aluminiumschrotte benötigt.

Für die Primärkupferherstellung ist der Anteil des elektrischen Energieverbrauchs deutlich niedriger als bei der Primäraluminiumproduktion, da der Schmelzprozess mit Brennstoffen durchgeführt wird. Der Stromanteil beträgt lediglich etwa 26 Prozent.[29] Bei der Sekundärproduktion ist der Stromanteil aufgrund der elektrischen Aufbereitungsprozesse deutlich größer. In Abhängigkeit der Recyclingmaterialien unterliegt dieser Wert jedoch starken Schwankungen. Aufgrund der erforderlichen Schmelzprozesse überwiegt jedoch trotzdem der Brennstoffverbrauch.[30] In der Kupferindustrie wird hauptsächlich Erdgas eingesetzt.[31]

Für die NE-Metallgießereien liegt der Stromanteil am gesamten Energiebedarf bei etwa 40 Prozent.[32] Der überwiegende Einsatz von Brennstoffen ist auf den brennstoffintensiven Schmelzprozess zurückzuführen. Der Brennstoffverbrauch wird hauptsächlich durch Erdgas gedeckt.[33] Bei Leichtmetallgießereien liegt der Erdgasanteil bei 89 Prozent, bei Buntmetallgießereien[34] bei 81 Prozent.[35]

Zuordnung zu amtlicher Statistik. In der amtlichen Statistik werden die NE-Metallindustrien der Metallerzeugung und -bearbeitung (NACE Code 24) zugeordnet. In NACE Code 24.4 sind die NE-Metalle verortet. Aufgrund des hohen Energieverbrauchs und der hohen Emissionen werden nachfolgend lediglich die Erzeugung und erste Bearbeitung von Aluminium (24.42) und Kupfer (24.44) betrachtet.

Gießereien sind in der amtlichen Statistik mit NACE Code 24.5 gekennzeichnet. Die Aluminium- und Kupfer-verarbeitenden NE-Metallgießereien werden nach NACE Klassifikation in die Leichtmetallgießereien (24.53) und in die Buntmetallgießereien (24.54) unterteilt.

[27] *Ostermann* (2014); *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).
[28] *Ostermann* (2014).
[29] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).
[30] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).
[31] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018); *Destatis* (2016).
[32] *Destatis* (2016); *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).
[33] *Destatis* (2016).
[34] Buntmetalle umfassen eine Untergruppe der NE-Metalle. Zu diesen zählen Metalle wie Kupfer, Zink, Blei, Nickel, Zinn und Seltenmetalle. Diese Metalle sind selbst farbig oder bilden farbige Legierungen, wie Messing, Bronze und Rotguss, wobei die Legierungen ebenfalls zu den Buntmetallen gezählt werden. Nach (*WVM*, 2018).
[35] *Destatis* (2016).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

Geographische Aufteilung.[36] In Deutschland existieren lediglich vier Aluminiumhütten, die Primäraluminium herstellen. Diese sind vorwiegend auf Nord- und Westdeutschland verteilt. Ein Produktionsschwerpunkt der Sekundäraluminiumindustrie ist in Nordrhein-Westfalen (NRW) zu finden. In (*European Aluminium*, 2018a) sind 33 Sekundäraluminiumwerke verzeichnet, wovon etwa 39 Prozent in NRW zu finden sind.

In Deutschland existiert eine Primärkupferhütte in Hamburg. Hier wird gleichzeitig Sekundärkupfer produziert. Zusammen mit der Sekundärproduktion in Lünen bilden diese beiden Werke die einzigen Aufbereitungsstandorte von Kupfer in Deutschland.

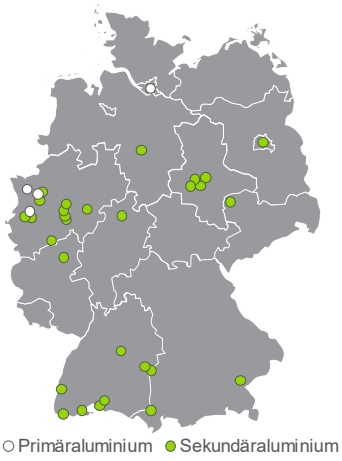

Abbildung 1-1. Überblick über Aluminiumstandorte in Deutschland[36]

Für eine genaue georeferenzierte Betrachtung der NE-Metallgießereien liegen keine Daten vor. Allerdings sind Daten für die gesamtdeutsche Gießereiindustrie verfügbar. Die gesamte Gießereiindustrie umfasst rund 600 Standorte, von denen rund 25 Prozent in Nordrhein-Westfalen zu finden sind. In Hessen und Baden-Württemberg finden sich weiterhin mehr als ein Drittel der Gießereien.[37] Der größte Teil der Gießereiunternehmen hat seinen Standort aufgrund der historisch engen Zusammenarbeit mit den Abnehmern und der Anforderungen der heutigen Zulieferlogistik in Kundennähe.[38]

Branchenstruktur. Wird bei der Aluminiumindustrie lediglich die Herstellung von Aluminium und damit die Weiterverarbeitung zu Guss- oder Halbzeugen nicht betrachtet, zeigt sich eine sehr homogene Branchenstruktur. Analog zur Herstellung von Kupfer werden lediglich Produkte hinsichtlich der Primär- und Sekundärherstellungsroute unterschieden. Dabei ist der Sekundäranteil in der Aluminiumindustrie im Jahr 2015 mit knapp 57 Prozent deutlich höher als in der Kupferindustrie (42 Prozent). Die Homogenität der Branche wird beispielsweise auch durch die Anzahl der Unternehmen zur Herstellung von Primäraluminium deutlich. So existieren in Deutschland nur zwei Unternehmen, die Primäraluminium produzieren.[39] Bei der Weiterverarbeitung ist eine deutlich heterogenere Produktpalette vorzufinden. In NE-Metallgießereien werden u. a. Aluminium- und Kupfergusse hergestellt. Ferner wird Aluminium und Kupfer zu Halbzeugen wie Stangen, Rohre und Drähte sowie zu weiteren Endprodukten wie Pulver, Folien und Dosen weiterverarbeitet.[40] Gießereien können klassischerweise als Mittelstandsindustrie charakterisiert werden. Etwa 93 Prozent der Unternehmen beschäftigen bis zu 500 Mitarbeiter. Größere Betriebe machen lediglich 7 Prozent der Gießereiindustrie aus.[41]

Wertschöpfungskette. Die Wertschöpfungskette der ausgewählten NE-Metallindustrien wird in Abbildung 1-2 dargestellt. Dabei wird grundsätzlich zwischen der Primäraluminium- und Primärkupferproduktion aus Bauxit bzw. Kupfererzen und der Sekundäraluminium- und Sekundärkupferproduktion aus Schrotten[42] unterschieden. Über die Zwischenprodukte Aluminiumoxid bzw. Kupferkonzentrat wird über die Primärroute Aluminium und Kupfer produziert. Um Sekundäraluminium bzw. -kupfer zu erhalten, sind eine Aufbereitung der Schrotte und weitere Prozesse erforderlich. Anschließend werden die NE-Metalle zu Halbzeugen oder zu Gusserzeugnissen weiterverarbeitet.[43] Eine unablässige Kernkompetenz der Gießereien ist hierbei

[36] *European Aluminium* (2018b, 2018a).
[37] *Lickfett* (2018b).
[38] *Lickfett* (2018b).
[39] *Wellner/Mählmann/Postler* (2016).
[40] *Wellner/Mählmann/Postler* (2016).
[41] *Lickfett* (2018a).
[42] Altkupfer, Legierungsabfälle, Elektronik-Schrotte und Industrierückstände werden hier zusammengefasst betrachtet. Anzumerken ist jedoch, dass sich der Aufwand für das Recycling bei diesen Ausgangsprodukten stark unterscheidet.
[43] *Bauknecht u. a.* (2016).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

das Gießen, Abkühlen und Ausleeren der verwendeten Form.[44] Die entstehenden Produkte werden in den Handel gegeben und dort an Endverbraucher verkauft bzw. in anderen Industrien weiterverarbeitet.[45] Ein Hauptabnehmer für Aluminium ist die Automobilindustrie in Deutschland.[46] Tendenziell umfasst die Wertschöpfungskette der Sekundärroute zur Produktion von Aluminium und Kupfer deutlich weniger Schritte als die Primärroute.[47]

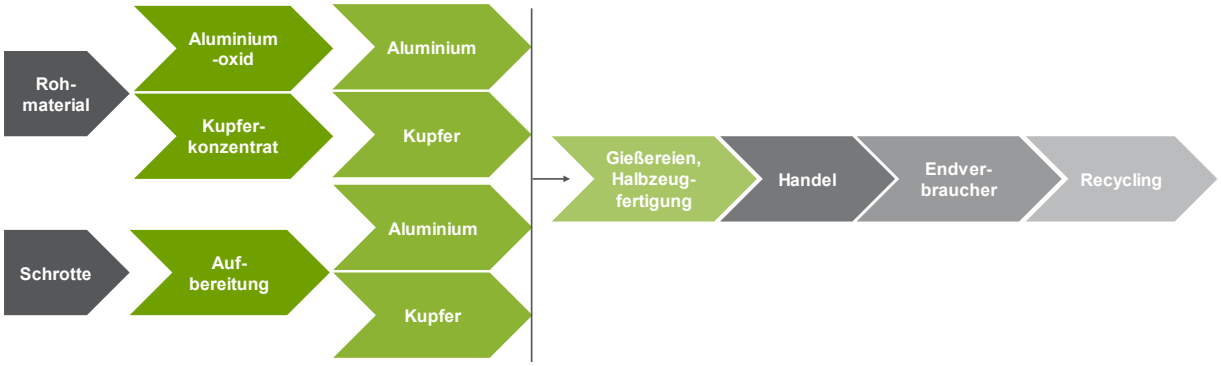

Abbildung 1-2. Vereinfachte Wertschöpfungskette der Aluminium- und Kupferindustrie mit der Weiterverarbeitung in NE-Metallgießereien und -Halbzeugfertigung

Flexibilitätspotenziale. Bei der Herstellung von Primäraluminium weißt vor allem die zu 100 Prozent mit elektrischer Energie durchgeführte Aluminiumelektrolyse nennenswerte Flexibilitätspotenziale auf.[48] Bei der Aluminiumelektrolyse werden in etwa 82 Prozent der gesamten elektrischen Energie der Primäraluminiumherstellung verbraucht.[49] Die Gewinnung von Aluminium wird mittels Schmelzflusselektrolyse (Aluminiumelektrolyse) nach dem Hall-Heroult-Verfahren durchgeführt.[50] Hierbei wird in Elektrolysezellen Gleichspannung an Elektroden angelegt, um Aluminiumoxid zu reduzieren und metallisches Aluminium zu erzeugen.[51] Die Lastflexibilisierung selbst, wird entweder durch das Abschalten der Elektrolysezelle, oder durch die Variation der Stromstärke der in Reihe geschalteten Elektrolysezellen erreicht.[52] Hierbei ist zum einen der Aluminiumoxidspeicher als Puffer zur Entkoppelung der Aluminiumelektrolyse relevant. Zum anderen dient der sogenannte „Aluminiumsee“ in der Elektrolysezelle als Speicherkapazität zur Entkoppelung nachgelagerter Prozessschritte.[53] Ein Hindernis für die Lastflexibilisierung ist jedoch das sehr kleine thermische Arbeitsfenster konventioneller Aluminiumelektrolysezellen.[54] In einer Aluminiumelektrolysezelle herrschen typischerweise Temperaturen um 950 °C.[55] Die Einhaltung dieser Temperatur ist zur Aufrechterhaltung des thermischen Gleichgewichts stets zu gewährleisten.[56] Eine größere thermische Veränderung über einen längeren Zeitraum als vier Stunden, würde die Elektrolysezelle irreparabel beschädigen.[57] Bei der konventionellen Elektrolysezelle ist ein Teillastbetrieb für positive Flexibilitätsabrufe zudem aufgrund des magnetischen Gleichgewichts nicht möglich,[58] lediglich eine Abschaltung für weniger als vier Stunden kann erfolgen. Jedoch ist ein Überlastbetrieb von etwa

[44] *Bosse et al.* (2013).
[45] *Bosse et al.* (2013).
[46] *Wellner/Mählmann/Postler* (2016).
[47] *Grimes/Donaldson/Cebrian Gomez* (2008); *Ostermann* (2014).
[48] *Scheven/Hartkopf/Prelle* (2012); *Energieblog* (2015); *Bauknecht u. a.* (2016).
[49] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).
[50] *Kammer* (2009).
[51] *Kammer* (2009); *Pohling* (2015); *Hauck* (2016).
[52] *Gruber* (2017).
[53] *Hauck, Heribert, TRIMET Aluminium SE* (2017); *Nübold* (2017).
[54] *Hauck, Heribert, TRIMET Aluminium SE* (2017).
[55] *Ostermann* (2014).
[56] *Hauck* (2013).
[57] *Wietschel/Ullrich* (2015); *Moll* (2013); *Arnold* (2012).
[58] *Hauck, Heribert, TRIMET Aluminium SE* (2017).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

2 Prozent über der Nennleistung durchführbar.[59] Da Elektrolysezellen nahezu dauerhaft bei Nennlast betrieben werden,[60] ist der Produktionsausgleich bei positiven Flexibilitätsabrufen folglich nur über ein großes Zeitfenster möglich.[61] Demgemäß ist die Flexibilität der konventionellen Elektrolysezelle trotz der hohen Potenziale derzeit als gering anzusehen.[62] Abhilfe sollen technische Veränderungen der Elektrolysezellen bewirken, die eine Variation der Last um +/- 25 Prozent der Nennleistung über einen längeren Zeitraum ermöglichen, und ab Juli 2018 im Essener Werk der Trimet SE eingesetzt werden.[63] Positiv für eine Lastflexibilisierung ist insbesondere die werkseitig besonders kurze Vorlaufzeit bei der Aluminiumelektrolyse zu bewerten. Dies wird u. a. durch automatisierte Steuer- und Kontrollorgane sichergestellt.[64] Weiterhin ist die Zeit für An- und Abfahrvorgänge mitunter so kurz, dass die Produktionsanlagen oftmals für die Primärregelung präqualifiziert sind.[65] Es ergeben sich branchenübergreifend vergleichsweise hohe positive Flexibilitätspotenziale.[66] Negative Flexibilitätspotenziale sind aufgrund der hohen Auslastung der Aluminiumelektrolyse im branchenvergleich hingegen gering.[67] Flexibilitätspotenziale der Primäraluminiumherstellung werden bereits über die Sekundärregelleistung vermarktet.[68]

Bei der Primärroute der Kupferherstellung sind Flexibilitätspotenziale vor allem bei der strombasierten Kupferelektrolyse vorhanden.[69] In dieser letzten Raffinationsstufe scheidet sich Kupfer in Form von Kathoden ab. Der elektrische Energiebedarf für die Elektrolyse beträgt 300 – 400 kWh pro Tonne Kupferkathode und macht somit bis zu 30 Prozent des gesamten elektrischen Energiebedarfs der Kupferherstellung in der Kupferhütte aus.[70] Flexibilität kann durch die Reduktion der in Reihe geschalteten Kupferelektrolysezellen bereitgestellt werden.[71] Eine Abschaltung der Kupferelektrolysezellen ist nicht möglich, da diese durchgängig betrieben werden und ein Produktionsausfall nicht nachzuholen ist. Im Branchenvergleich sind die Flexibilitätspotenziale der Kupferelektrolyse jedoch als gering einzustufen.[72] Vor allem die sehr schnelle Lastabschaltung für längere Zeiträume macht die flexible Betriebsweise attraktiv. Positive und negative Flexibilitätspotenziale sind in Deutschland in der Kupferindustrie vorhanden[73], sind jedoch noch nicht quantifiziert worden. Hemmnisse bestehen vor allem durch die hohe Prozessauslastung und fehlende Zwischenspeicher.[74]

Bei der Herstellung von Sekundäraluminium und -kupfer aus Schrotten wird im Vergleich zur Primärkupferherstellung in Abhängigkeit der Ausgangsrohstoffe im Schnitt deutlich weniger Energie benötigt.[75] Flexibilitätspotenziale bieten sich vor allem durch das Aufschmelzen der Kupferschrotte in elektrisch betriebenen induktiven Schmelzöfen und bei der Herstellung der Kupferkathode durch die Kupferelektrolyse oder Kupferraffination. Im Vergleich zu anderen Branchen sind diese Flexibilitätspotenziale jedoch als gering einzuschätzen und demgemäß wenig untersucht. Flexibilitätspotenziale für Deutschland können deshalb nicht aufgeführt werden.

[59] *Hauck, Heribert, TRIMET Aluminium SE* (2017).
[60] *Ecofys* (2016); *Gruber/Roon/Fattler* (2016).
[61] *Hauck, Heribert, TRIMET Aluminium SE* (2017); *Paulus/Borggrefe* (2011).
[62] *Ecofys* (2016).
[63] *Hauck* (2013); *Hauck* (2016).
[64] *Kammer* (2009); *Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.* (2017).
[65] *Götz u. a.* (2017); *Köpke* (2013).
[66] *Ostermann* (2014).
[67] *Ostermann* (2014); *Kammer* (2009); *Gruber/Roon/Fattler* (2016); *Ecofys* (2016).
[68] *Götz u. a.* (2017).
[69] *Schmidthaler u. a.* (2014).
[70] *Lickfett* (2018a); *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).
[71] *Langrock* (2015); *Schmidthaler u. a.* (2014); *Klobasa* (2007); *Scholz u. a.* (2014); *Scheven* (2015).
[72] *Scholz u. a.* (2014); *Scheven* (2015); *Wille-Haussmann/Erge/Klobasa* (2009); *Focken/Bümmerstede/Klobasa* (2011).
[73] 50-100 MW für die Kupfer-, Zink-, Silizium- und Graphitproduktion positives und negatives Flexibilitätspotenzial in (*Steurer u. a.*, 2015).
[74] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018).
[75] *Steurer u. a.* (2013); *Steurer u. a.* (2015).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

Auch in Gießereien werden elektrische Induktionsöfen zum Schmelzen von Aluminium und Kupfer eingesetzt, die flexibilisiert werden können.[76] Zur Auslastung von Induktionsöfen gibt es verschiedene literarische Angaben: (*Steurer u. a.*, 2015) spricht hier von einem Pro der Auslastung für die Flexibilität, da häufig relativ geringe Prozessauslastungen vorliegen. (*Focken/Bümmerstede/Klobasa*, 2011) geht jedoch von einer hohen Auslastung der Schmelzaggregate und einer starken Verzahnung der Produktionsabläufe aus, und dementsprechend ein niedriges Flexibilitätspotenzial annimmt. Nach (*Steurer u. a.*, 2015) liegt für Gießereien ein positives Potenzial von etwa 100 MW positives Potenzial und negatives Potenzial von 10 – 20 MW in Deutschland vor. Für den Schmelzvorgang fallen für Kupferlegierungen etwa 300 kWh/t an und für Aluminium etwa 500 kWh/t an.[77] Jedoch verfügen nur ein gutes Drittel der Standorte über Induktionsöfen.[78]

Kreislaufwirtschaft. NE-Metalle werden nach dem Lebensende in der Regel wiederverwertet. Dieses erfolgt in der Aluminium- und Kupferindustrie in der Sekundärproduktion. Dabei sind Aluminium und Kupfer meist ohne Qualitätsverluste beliebig oft wiederverwertbar.[79] Das Recycling der beiden NE-Metalle ist auch insofern notwendig, da deutlich geringere Energiemengen zur Produktion des Endprodukts erforderlich sind und die Reichweite[80] insbesondere von Kupfer auf etwa 30 Jahr begrenzt ist.[81] Beide NE-Metalle verbleiben jedoch oft Jahrzehnte im Einsatz bevor diese wiederverwendet werden können.[82] Heute befinden sich noch fast vier Fünftel des jemals geförderten Kupfers und drei Viertel des Aluminiums im Umlauf. NE-Metalle werden häufig nicht in der EU recycelt, sondern am Lebensende für die Wiederverwertung nach Asien exportiert.[83] Erschwert wird das Recycling vor allem durch Materialverbunde und Miniaturisierung (E-Schrott), die Trennungsverfahren erfordern.[84] Dies kann den Energieverbrauch teilweise drastisch erhöhen. In elektronischen Geräten eingebautes Aluminium und Kupfer kann problemlos recycelt werden. Werden die NE-Metalle aber aus Gründen der Sparsamkeit nur noch leicht aufgesprüht, kann eine Wiedergewinnung unter Umständen wirtschaftlich nicht mehr sinnvoll sein.[85] Trotzdem nimmt sowohl in der Kupfer- als auch in der Aluminiumindustrie der Anteil der Sekundärproduktion an der Gesamtproduktion in Deutschland stetig zu.[86] In 2016 wuchs der Anteil der Sekundärproduktion an der gesamten Aluminiumproduktion um sieben Prozentpunkte auf 57 Prozent an.

[76] *Schmidthaler u. a.* (2014); *Focken/Bümmerstede/Klobasa* (2011); *Steurer u. a.* (2015).
[77] *Lickfett* (2018a).
[78] *Steurer u. a.* (2015).
[79] *BDE u. a.* (2018); *European Copper Institute* (2014).
[80] Verhältnis der Reserven zur Weltbergwerksförderung.
[81] *Bosse et al.* (2013).
[82] *BDE u. a.* (2018); *European Copper Institute* (2014).
[83] *BDE u. a.* (2018).
[84] *BDE u. a.* (2018).
[85] *BDE u. a.* (2018); *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).
[86] *2015 Minerals Yearbook* (2017).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

1.2 Produktionsprozesse in der NE-Metalle Industrie

Tabelle 1-2. Übersicht über die ausgewählten Prozesse der NE-Metallindustrie[87]

Produkt	Produktionsmenge Deutschland (2015) in kt	Emissionen in Mio. t CO_2-Äqui	Energieverbrauch in TWh	Beinhaltete Prozessschritte
Primäraluminium	541[88]	5,79	10,4	Rohstoffgewinnung, Aluminiumelektrolyse
Sekundäraluminium	620[89]	0,58	1,9	Aufbereiten von Aluminiumschrotten, Schmelzen
Primärkupfer	397[90]	0,4	1,2	Sulfidische Kupfererze: Schmelzofen, Konverter, Feuerraffination, Kupferelektrolyse[91]
Sekundärkupfer	281[6]	0,2	0,5	Aufbereitungsprozesse, Schmelzen
Gießereien	1.221[92]	1,8	4,2	Gießen

Auswahl relevanter Prozesse. Im Rahmen des Steckbriefs werden verschiedene NE-Metallindustrien und deren Herstellungsverfahren untersucht. Für die Produktion von Aluminium und Kupfer werden sowohl die Primär-, als auch die Sekundärherstellungsprozesse betrachtet. Neben diesen Produktionsprozessen werden zudem NE-Metallgießereien behandelt. NE-Metallgießereien verarbeiten u. a. Aluminium und Kupfer zu Gusslegierungen weiter. Die Erzeugung von NE-Halbzeugen wie Stangen, Rohre oder Drähte wird nicht betrachtet. Weitere Herstellungsverfahren der Zinn-, Zink- oder Bleiindustrie werden aufgrund der geringeren Gesamtemissionen vernachlässigt.

[87] Wenn nicht anders vermerkt: Spezifische Emissionen aus *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013) und Produktionsmengen für das Jahr 2015 zur Berechnung des Energieverbrauchs, Emissionen über spezifische Emissionen ebenfalls aus (*Fleiter/Schlomann/Eichhammer*, 2013) mit Produktionsmengen für das Jahr 2015.

[88] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018); *Wellner/Mählmann/Postler* (2016).

[89] *Wellner/Mählmann/Postler* (2016).

[90] *2015 Minerals Yearbook* (2017).

[91] Kupfer wird in Deutschland nicht aus oxidischem Kupfer hergestellt, deshalb sind hier nur die relevanten Prozessschritte für die Herstellung von Kupfer aus sulfidischen Kupfererzen angegeben.

[92] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

1.1.1 Aluminiumherstellung

Prozess. Die Primäraluminiumherstellung kann in fünf Prozessschritte untergliedert werden und ist in Abbildung 1-3 dargestellt.

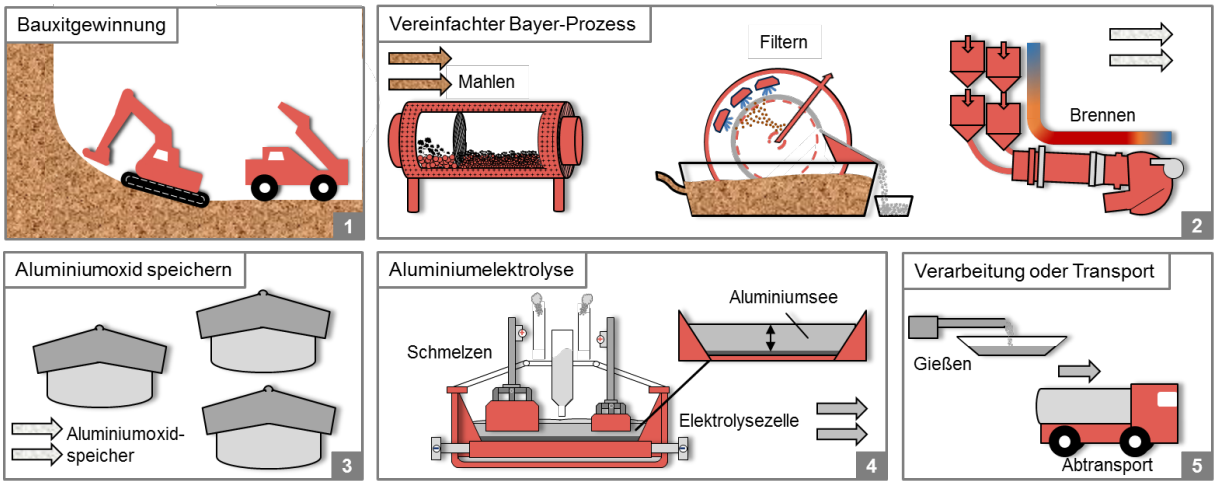

Abbildung 1-3: Herstellungsprozess von Primäraluminium[93]

In Prozessschritt 1 wird der erforderliche Rohstoff Bauxit im Tagebau mithilfe von Schaufelradbaggern abgebaut.[94] Bauxit wird seit dem Jahr 1976 nur noch außerhalb Deutschlands gefördert.[95] Aus Bauxit wird in Prozessschritt 2 das für die Primäraluminiumherstellung benötigte Aluminiumoxid gewonnen. Dieses wird im sogenannten Bayer-Prozess durch diverse Mahl-, Filter und Brennprozesse erzeugt.[96] In Deutschland wird Aluminiumoxid lediglich in Stade-Bützfleth von der Aluminium Oxid Stade GmbH produziert. Dieses Werk stellt etwa eine Million Tonnen Aluminiumoxid pro Jahr her.[97]

In Prozessschritt 3 wird das Aluminiumoxid in Speichern zwischengelagert.[98] Aus Aluminiumoxid wird in Prozessschritt 4 Aluminium hergestellt.[99] Die Gewinnung von Aluminium wird in Deutschland ausschließlich mittels Schmelzflusselektrolyse (Aluminiumelektrolyse) nach dem Hall-Heroult-Verfahren durchgeführt.[100] Hierbei wird in Elektrolysezellen Gleichspannung an Elektroden angelegt, um Aluminiumoxid zu reduzieren und metallisches Aluminium zu erzeugen.[101] In einer Aluminiumelektrolysezelle herrschen typischerweise Temperaturen um 950 °C.[102] Die Einhaltung dieser Temperatur ist zur Aufrechterhaltung des thermischen Gleichgewichts stets zu gewährleisten.[103] Die Aluminiumelektrolyse wird zu 100 Prozent mit elektrischer Energie durchgeführt.[104] Bei der Aluminiumelektrolyse werden in etwa 82 Prozent der gesamten Energie der Primäraluminiumherstellung verbraucht.[105] Das in der Elektrolysezelle entstandene Primäraluminium

[93] Eigene Darstellung nach (*Ostermann*, 2014) und (*Kammer*, 2009).
[94] *Kammer* (2009); *Fottner/Handrich* (19999).
[95] *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe* (2013); *Kickshinrichs/Poganietz* .
[96] *Ostermann* (2014).
[97] *AOS* (2017).
[98] *Kammer* (2009).
[99] *Ostermann* (2014).
[100] *Kammer* (2009).
[101] *Kammer* (2009); *Pohling* (2015).
[102] *Ostermann* (2014).
[103] *Hauck, Heribert, TRIMET Aluminium SE* (2017).
[104] *Kammer* (2009); *Ecofys* (2016).
[105] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

wird in Prozessschritt 5 abgesaugt und entweder direkt weiterverarbeitet (Gießen) oder in flüssiger oder fester Form zu anderen Unternehmen transportiert.[106]

Sekundäraluminium wird in einem Recyclingprozess aus Aluminiumschrotten wie Neu- und Altschrotten, Krätze[107] und Spänen hergestellt.[108] Die Sekundäraluminiumproduktion kann in drei Prozessschritte unterteilt werden: Die Aufbereitung von Schrotten, das Schmelzen von Schrotten sowie die anschließende Verarbeitung des Umschmelzaluminiums.[109]

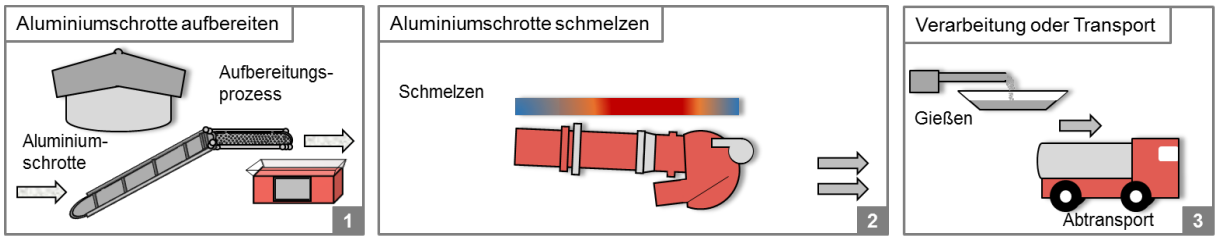

Abbildung 1-4. Herstellungsprozess von Sekundäraluminium[110]

Altschrotte sind im Vergleich zu Neuschrotten[111] oftmals durch Lacke, Öle oder ähnliche Verschmutzungen verunreinigt. Altschrotte müssen demgemäß im ersten Prozessschritt aufbereitet werden, um das enthaltene metallische Aluminium stofflich zu trennen.[112] Hierzu werden diese zunächst in Schreddern zerkleinert. Anschließend wird metallisches Aluminium in Windsichtanlagen, Magnetabscheidern und Schwimm-Sink-Anlagen mechanisch, magnetisch und durch das Ausnutzen von Dichteunterschieden separiert.[113] Der Energieeinsatz für die Produktion von Sekundäraluminium hängt maßgeblich von den eingesetzten Schrotten ab.[114] Folglich ist der spezifische Energieeinsatz für die Schrottaufbereitung bei Neuschrotten mit höherem Aluminiumanteil deutlich geringer als bei Altschrotten mit höherer Verunreinigung und niedrigerem Aluminiumanteil.[115] Nach der Aufbereitung der Schrotte wird das Aluminium bei etwa 660 °C in unterschiedlichen Ofentypen geschmolzen. Der eingesetzte Ofentyp hängt von der Verunreinigung der verwendeten Schrotte ab. Mit steigender Verunreinigung finden Induktionsöfen, Herdöfen und abschließend Drehtrommelöfen (höchste Verunreinigungslatenz) Verwendung.[116] Das nach dem Schmelzen flüssige Sekundäraluminium wird anschließend in Gießereien zu Halbzeugen oder Gusslegierungen vergossen. Beim Schmelzen wird aufgrund des Hochtemperaturprozesses mit etwa 47 Prozent des gesamten Energieverbrauchs deutlich mehr Energie als bei der Aufbereitung (18 Prozent des Gesamtenergiebedarfs) eingesetzt.[117] Typische spezifische Energieverbräuche für das Schmelzen liegen zwischen 2 und 4,7 GJ/t Sekundäraluminium.[118]

[106] *Ostermann* (2014); *Langrock* (2015).

[107] Bei Krätze handelt es sich um eine Mischung aus Aluminium und feinen Oxidpartikeln, die auf der Oberfläche von flüssigem Aluminium und Aluminiumlegierungen beim Kontakt mit Sauerstoff entstehen. Damit keine Verunreinigungen durch Oxidpartikel auftreten, wird die Krätze vor dem Gießen von der Oberfläche des Metallbads abgeschöpft, (*enArgus*, 2017b).

[108] *enArgus* (2017b); *Kammer* (2009).

[109] *Ostermann* (2014).

[110] Eigene Darstellung nach (*enArgus*, 2017b) und (*Ostermann*, 2014).

[111] Krätze und Späne können im weiteren Sinne den Neuschrotten zugeordnet werden.

[112] *Ostermann* (2014).

[113] *Ostermann* (2014); *Kammer* (2009); *enArgus* (2017b).

[114] *enArgus* (2017b).

[115] *enArgus* (2017b); *Kammer* (2009).

[116] *Ostermann* (2014); *enArgus* (2017b).

[117] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).

[118] *enArgus* (2017b).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

Brennstoffbedarf. Der spezifische Brennstoffverbrauch der Primäraluminiumherstellung beträgt etwa 4,78 MWh/t. Davon sind ca. 81 Prozent auf die Kohlenstoffanode als Rohstoff zurückzuführen.[119][120] Brennstoffe werden bei der Primäraluminiumproduktion nahezu ausschließlich für die Gewinnung von Bauxit und die Herstellung von Aluminiumoxid eingesetzt. Der spezifische Brennstoffbedarf der Sekundäraluminiumproduktion liegt mit 2,5 MWh/t niedriger als in der Primärproduktion.[121] Dieser resultiert aus Umschmelzprozessen, die meist mit Brennstoffen durchgeführt werden. Hierbei wird mit einem Anteil von 93 Prozent hauptsächlich Erdgas eingesetzt. Der Rest des Brennstoffverbrauchs entfällt auf schweres Heizöl.[122]

Strombedarf. Der spezifische Strombedarf der Primäraluminiumherstellung beträgt je nach Technologie und Prozesseffizienz etwa 14,5 MWh/t.[123] Für die Sekundäraluminiumherstellung werden lediglich etwa 0,5 MWh/t elektrische Energie benötigt.[124] Dies ist zum einen auf den niedrigeren Gesamtenergieverbrauch, zum anderen auf den höheren Brennstoffverbrauch bei der Sekundäraluminiumherstellung im Vergleich zur Primäraluminiumherstellung zurückzuführen.

Für die Primäraluminiumherstellung fällt folglich ein gesamter spezifischer Energieverbrauch von etwa 19 MWh/t an. Für die Sekundäraluminiumherstellung ein spezifischer Energiebedarf von 3 MWh/t. In Abbildung 1-5 sind die absoluten Energieverbräuche aufgeschlüsselt nach Strom- und Brennstoffverbrauch für das Jahr 2015 dargestellt.

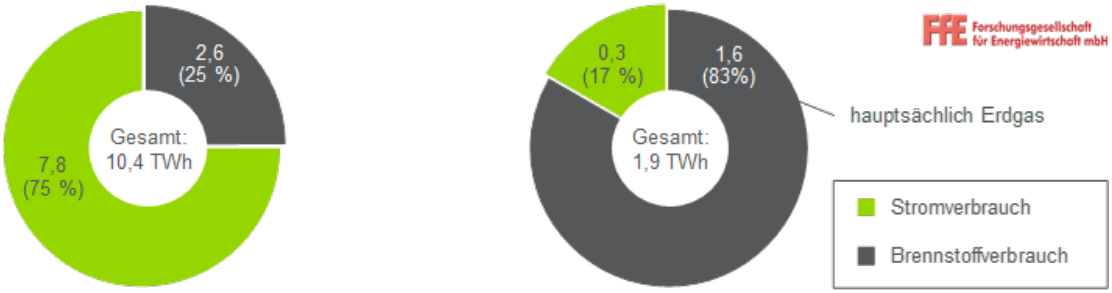

Abbildung 1-5. Absoluter Energieverbrauch der Primär (links)- und Sekundäraluminiumherstellung (rechts) aufgeteilt nach Strom- und Brennstoffverbrauch für das Jahr 2015[125]

Emissionen. Bei der Primäraluminiumherstellung sind etwa 90 Prozent der THG-Emissionen auf den Stromverbrauch zurückzuführen.[126] Prozessbedingte THG-Emissionen entstehen vor allem beim Anodenbrand und dem sogenannten Anodeneffekt (Prozessstörung, PFC wird freigesetzt).[127] Pro Tonne Primäraluminium fallen etwa 10,7 t CO_2e an.[128] Bei der Sekundäraluminiumherstellung fallen keine nennenswerten prozessbedingten Emissionen an.[129] Spezifische energiebedingte Emissionen fallen in Höhe von etwa 0,93 t CO_2e/t Sekundäraluminium an.[130] In Tabelle 1-3 sind die absoluten

[119] *Moya u. a.* (2015).
[120] Dieser Wert gilt für Anlagen, die das Aluminiumoxid importieren. Durch die Herstellung von Aluminiumoxid in Stade-Bützfleth von der Aluminium Oxid Stade GmbH entsteht zusätzlicher Energieverbrauch.
[121] *Ostermann* (2014); *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).
[122] *Ostermann* (2014).
[123] *Ostermann* (2014); *Kammer* (2009); *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013); *Moya u. a.* (2015).
[124] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).
[125] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013); *Wellner/Mählmann/Postler* (2016).
[126] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).
[127] *Hydro* (2016).
[128] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).
[129] Prozessbedingte Emissionen können bei der Sekundäraluminiumherstellung aus Anhaftungen an Schrotten entstehen, werden nachfolgend jedoch vernachlässigt, (*Fleiter/Schlomann/Eichhammer*, 2013).
[130] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

Emissionen sowie der absolute Brennstoff und Stromverbrauch der Primär- und Sekundäraluminiumindustrie in Deutschland zusammengefasst.

Tabelle 1-3. Brennstoff- und Stromverbrauch sowie THG-Emissionen in der Aluminiumindustrie im Jahr 2015[131]

Produkt	Produktionsmenge Deutschland in kt	Brennstoffverbrauch in TWh/a	Stromverbrauch in TWh/a	Emissionen in Mio. t CO_2e
Primäraluminium	541	2,59	7,8	5,79
Sekundäraluminium	620	1,55	0,31	0,58

1.2.1 Kupferherstellung

Prozess. Die Herstellungsrouten zur Produktion von Primärkupfer unterscheiden sich hinsichtlich der Ausgangsrohstoffe. Werden sulfidische Kupfererze verwendet, kann der Produktionsprozess in acht Prozessschritte unterteilt werden. Werden oxidische Kupfererze eingesetzt, sind lediglich fünf Prozessschritte erforderlich (vgl. Abbildung 1-6). In Deutschland werden überwiegend sulfidische Erze in der Kupferproduktion verarbeitet.[132]

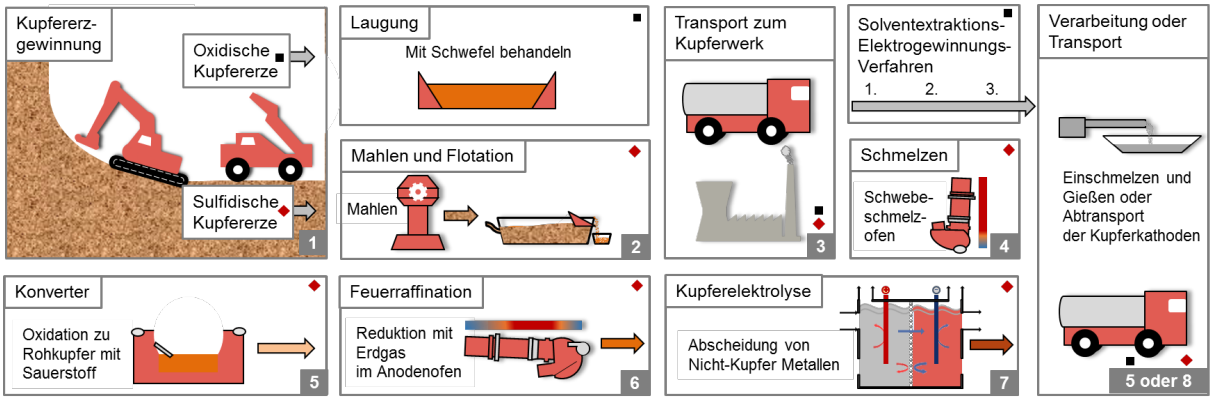

Abbildung 1-6. Kupfergewinnung aus oxidischen (Rechteck, schwarz) und sulfidischen Kupfererzen (Raute, rot) bis hin zur Kupferkathodenverarbeitung[133]

Sowohl sulfidische als auch oxidische Kupfererze werden in einem ersten Prozessschritt in Kupferminen gewonnen.[134] Werden sulfidische Kupfererze eingesetzt, ist in Prozessschritt 2 zunächst ein Mahlprozess erforderlich. Anschließend wird das gemahlene, hydrophobe (wasserabweisende) Kupfererz durch Flotation angereichert. Hierbei werden in einem Rührbecken feste Partikel in einer Flüssigkeit aggregiert. Die entstehenden Aggregate können mit einem Abstreifer abgezogen werden. Hierbei entsteht Kupferkonzentrat. Die Flotation erfolgt in der Regel an den Kupferminen selbst. Für die Erzgewinnung, Mahlung und Flotation aus sulfidischen Kupfererzen werden etwa 70 Prozent des gesamten Energieverbrauchs der Kupferproduktion aufgewendet, die nicht in Deutschland durchgeführt wird.[135] Ein Großteil des Energieverbrauchs bei der Kupferherstellung findet demnach nicht in Deutschland statt. Dieser Teil des Energieverbrauchs und der Emissionen werden dem NE-

[131] *Wellner/Mählmann/Postler* (2016); *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).
[132] *Ostermann* (2014).
[133] Eigene Darstellung nach (*enArgus*, 2017a).
[134] *enArgus* (2017a).
[135] *Kammer* (2009).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

Metallerzbergbau (NACE Code 07.2) zugeordnet. Die im Steckbrief angegeben Werte beziehen diesen Energieverbrauch und die Emissionswerte nicht mit ein. Anschließend wird das Kupfer in Prozessschritt 3 zu Kupferwerken transportiert. In Prozessschritt 4 wird das Kupferkonzentrat mit sauerstoffreicher Luft in Schwebeschmelzöfen eingeführt. Das Kupferkonzentrat reagiert im Ofen mit Sauerstoff und wird durch die freiwerdende Wärme der exothermen Reaktion bei 1.200 °C geschmolzen.[136] Hierbei entsteht flüssiger Kupferstein (Cu_2S) mit einem Kupfergehalt von bis zu 65 Prozent. In Prozessschritt 5 wird der Kupferstein zu einem Konverter transportiert. Im Konverter wird durch Einblasen von Sauerstoff Rohkupfer (Schwarzkupfer, Blisterkupfer) mit einem Kupfergehalt von bis zu 98 Prozent erzeugt (Oxidation). In der anschließenden Feuerraffination wird das Rohkupfer im Anodenofen mit Erdgas reduziert und Reste von Eisen und Schwefel entfernt (Prozessschritt 6). Es entsteht Anodenkupfer mit einem Kupfergehalt von 99 Prozent. Im vorletzten Prozessschritt (Prozessschritt 7) wird aus Anodenkupfer in der Kupferelektrolyse hochreines Kupfer (Kathodenkupfer) gewonnen. Hierbei wird das Kupfer von weiteren Metallen getrennt. Für die Kupferelektrolyse ist ein Zeitraum von etwa drei Wochen erforderlich.

Oxidische Kupfererze hingegen sind nicht hydrophob. Eine Aggregation über Flotation ist folglich nicht möglich. Deshalb wird das Material auf einer Halde nahe der Kupfermine in Prozessschritt 2 zunächst mit Schwefelsäure behandelt (Laugung). Hierdurch entsteht ein kupferhaltiges Konzentrat. Dieses wird in Prozessschritt 3 ebenfalls zu Kupferwerken transportiert. Dort wird in Prozessschritt 4 das Solventextraktions-Elektrogewinnungs-Verfahren angewendet. Hierdurch wird in drei Schritten aus dem kupferhaltigen Konzentrat hochreines Kupfer (Kathodenkupfer) gewonnen: Solventextraktion, Strippen und Electrowinning[137].

Das Kathodenkupfer beider Herstellungsrouten wird in Prozessschritt 5 bzw. 8 eingeschmolzen und je nach Weiterverarbeitungspfad zu Rundbarren, Blöcken oder Walzdraht vergossen. Im Handel weist das Kathodenkupfer in der Regel eine Reinheit von mindestens 99,95 Prozent auf.[138]

Bei der Sekundärkupferherstellung wird Kupfer in einem Recyclingprozess aus Kupferschrotten hergestellt. Je nach Reinheitsgrad wird das Kupfer direkt in integrierten Kupferwerken verarbeitet oder muss zunächst aufbereitet werden. Die anschließenden Prozesse laufen ähnlich zur Primärkupferherstellung ab (vgl. Abbildung 1-6, Prozessschritt 4). In Deutschland werden etwa 40 Prozent des Kupfers durch Recycling gewonnen.[139]

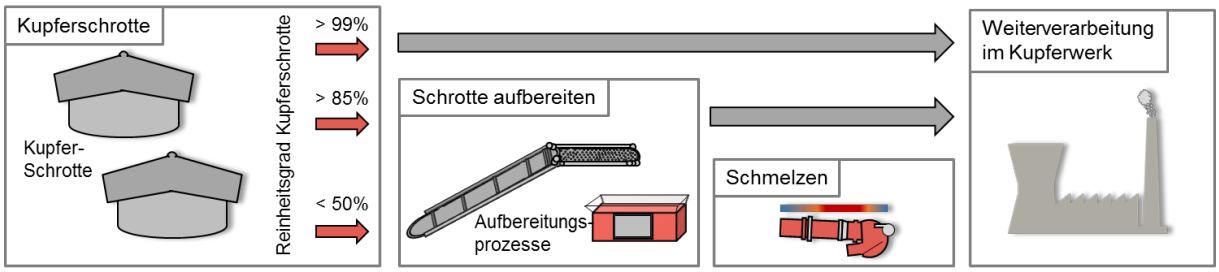

Abbildung 1-7. Sekundärkupferherstellung in Abhängigkeit des Reinheitsgrades der Kupferschrotte[140]

Bei einer Reinheit der Kupferschrotte von unter 99 Prozent sind zusätzliche Prozesse für das Recycling notwendig. Kupferschrotte mit einer Reinheit von bis zu 85 Prozent werden zunächst in

[136] *enArgus* (2017a); *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).

[137] Bei der Solventextraktion werden durch die Verwendung organischer Lösungsmittel Kupferionen in die organische Phase überführt und aufkonzentriert. Beim anschließenden Strippen wird stark konzentrierte Schwefelsäure hinzugegeben, was wiederum zu einer Verdrängung der reinen Kupferlösung aus der organischen Phase bewirkt. Im Electrowinning-Prozess werden schließlich Kupferionen aus der Kupferlösung durch das Anlegen einer elektrischen Spannung an Bleianoden herausgelöst. (*enArgus*, 2017a)

[138] *enArgus* (2017a).

[139] 2015 Minerals Yearbook (2017); *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).

[140] Eigene Darstellung nach (*enArgus*, 2017c).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

einem Konverter raffiniert. Dabei werden unedlere Bestandteile entfernt. Zu diesen Bestandteilen zählen unter anderem Blei, Zinn und Eisen. Hierbei entsteht Rohkupfer. Das Rohkupfer kann direkt im Anodenofen eines integrierten Kupferwerks verarbeitet werden. Kupferschrotte mit einem Kupfergehalt unter 50 Prozent werden zunächst mechanisch aufbereitet. Hierbei werden Kunststoff und Eisenfraktionen entfernt. Anschließend werden die Kupferschrotte analog zur Sekundäraluminiumherstellung in Schreddern, Magnetabscheidern, Windsichtanlagen und Schwimm-Sink-Anlagen zerkleinert und sortiert. Nach der mechanischen Aufbereitung werden die separierten Fraktionen in einem Schachtofen eingeschmolzen, um Zinn- und Zinkoxide abzuscheiden. Der Reinheitsgrad des entstehenden Kupfers reicht aus, um ebenfalls integrierten Kupferwerken zugeführt zu werden.[141] Bei Kupferschrotten, die eine sehr geringe Reinheit aufweisen, bzw. mit vielen weiteren Materialien verbunden sind, gilt es zu klären, ob ein Recycling sinnvoll ist. Die Energie- und THG-Einsparungen könnten durch ein aufwändiges Recycling kompensiert und sogar überschritten werden.

Bedarf an Rohstoffen und Zwischenprodukten. Primärkupfer wird aus Kupfererz gewonnen. Beim Kupfererz handelt es sich um sulfidisches oder oxidisches Kupfererz. Etwa 80 Prozent der Weltmarktproduktion ist auf sulfidische Kupfererze zurückzuführen.[142] Zudem wird Kupfer aus Kupferschrotten in einem Recyclingprozess gewonnen.[143] Hierbei werden Kupferschrotte mit hoher Reinheit, Altkupfer mit einer Reinheit von über 90 Prozent, Verbundmaterialien, Rückstände aus Galvanikschlämmen, Stäube und Katalysatoren unterschieden.

Brennstoffbedarf[144]**.** Für die Herstellung von Primärkupfer fällt ab dem Kupferwerk bis zur Kathode ein spezifischer Brennstoffbedarf von 2,2 MWh/t an.[145] In der Sekundärkupferproduktion sind lediglich etwa 50 Prozent des Brennstoffbedarfs der Primärkupferherstellung erforderlich (1,1 MWh/t).

Strombedarf. Im Vergleich zur Aluminiumherstellung wird deutlich weniger elektrische Energie bei der Kupferherstellung eingesetzt. Für die Primärkupferherstellung werden ab dem Kupferwerk etwa 0,77 MWh/t verwendet. Für die Produktion von Sekundärkupfer ist im Schnitt ein ähnlich hoher spezifischer Stromverbrauch in Höhe von 0,64 MWh/t erforderlich.[146]

Wird nicht mehr der Energieverbrauch für den gesamten Herstellungsprozess für eine Tonne Primär- und Sekundärkupfer bilanziert, sondern wie hier erst ab dem Kupferwerk, zeigt sich ein deutlich geringerer Unterschied im Energieverbrauch zwischen der Primärproduktion und der Sekundärproduktion. Der Energieverbrauch ist bei der Sekundärkupferherstellung hierbei nur noch um etwa 40 Prozent niedriger. Es wird deutlich, dass der größte Teil des Energieverbrauchs bei der Primärkupferherstellung auf die im Bergbau stattfindenden Prozesse zurückzuführen sind (Gewinnung, Mahlen, Flotation). Kumuliert ergibt sich ein spezifischer Energieverbrauch für die Primär- bzw. Sekundärkupferherstellung von 3 MWh/t bzw. 1,7 MWh/t. Die Energiekosten sind für etwa 25 bis 35 Prozent der gesamten Produktionskosten verantwortlich.[147] In Abbildung 1-8 sind die absoluten Energieverbräuche für das Jahr 2015 aufgeschlüsselt nach Strom- und Brennstoffverbrauch dargestellt.

[141] *enArgus* (2017c).

[142] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).

[143] *enArgus* (2017c).

[144] Sowohl für die nachfolgende Betrachtung des Brennstoffverbrauchs und des Stromverbrauchs werden die energetischen Verbräuche ab dem Kupferwerk betrachtet. Die für die Primärproduktion von Kupfer anfallende Gewinnung, Mahlung und Flotation (sulfidische Kupfererze) bzw. die Gewinnung und das Laugungsverfahren (oxidische Kupfererze) werden dem Bergbau zugeordnet. Deshalb ergibt sich auch insgesamt lediglich ein niedrigerer Energieverbrauch bei der Sekundärkupferproduktion von 40 % gegenüber der Primärproduktion. Analog gilt dies für die ausgewiesenen Emissionen

[145] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).

[146] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).

[147] *European Copper Institute* (2014).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

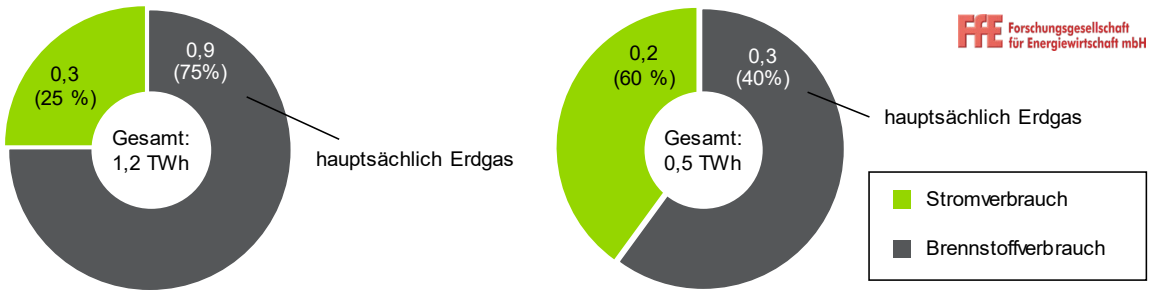

Abbildung 1-8. Absoluter Energieverbrauch der Primär- und Sekundärkupferherstellung aufgeteilt nach Strom- und Brennstoffverbrauch für das Jahr 2015 in Deutschland[148]

Emissionen. Für die Primärproduktion von Kupfer werden etwa 1,05 t CO_2e/t ausgestoßen. Trotz des im Schnitt um etwa 40 Prozent niedrigeren Energieverbrauchs der Sekundärproduktion, fallen die spezifischen THG-Emissionen nur um etwa 30 Prozent geringer aus.[149] Dies ist insbesondere auffällig, da der Stromanteil am Gesamtenergieverbrauch der Sekundärproduktion höher als bei der Primärproduktion von Kupfer ist. Dies ist auf einen niedrigeren Emissionsfaktor bei der Verwertung der Brennstoffe im Kupferwerk im Vergleich zum Strombezug aus dem Stromnetz zurückzuführen. In Tabelle 1-4 sind die absoluten Emissionen sowie der absolute Brennstoff- und Stromverbrauch der Primär- und Sekundärkupferindustrie in Deutschland zusammengefasst.

Tabelle 1-4. Brennstoff- und Stromverbrauch sowie THG-Emissionen in der Kupferindustrie im Jahr 2015[150]

Produkt	Produktionsmenge Deutschland in kt	Brennstoffverbrauch in TWh/a	Stromverbrauch in TWh/a	Emissionen in Mio. t CO_2e
Primärkupfer	397	0,9	0,3	0,4
Sekundärkupfer	281	0,3	0,2	0,2

KWK. Bei den Kupferhütten werden KWK-Anlagen betrieben, die die Prozessabwärme nutzen. Genaue Angaben zur installierten Leistung liegen nicht vor.

[148] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013); 2015 Minerals Yearbook (2017).
[149] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).
[150] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013); 2015 Minerals Yearbook (2017).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

1.1.2 Gießereien für NE-Metalle

In Gießereien werden Metalle in verschiedene Formen gegossen. Ein Überblick über die Einteilung der Gießverfahren ist in Abbildung 1-9 dargestellt. Nachfolgend werden lediglich NE-Metallgießereien betrachtet.

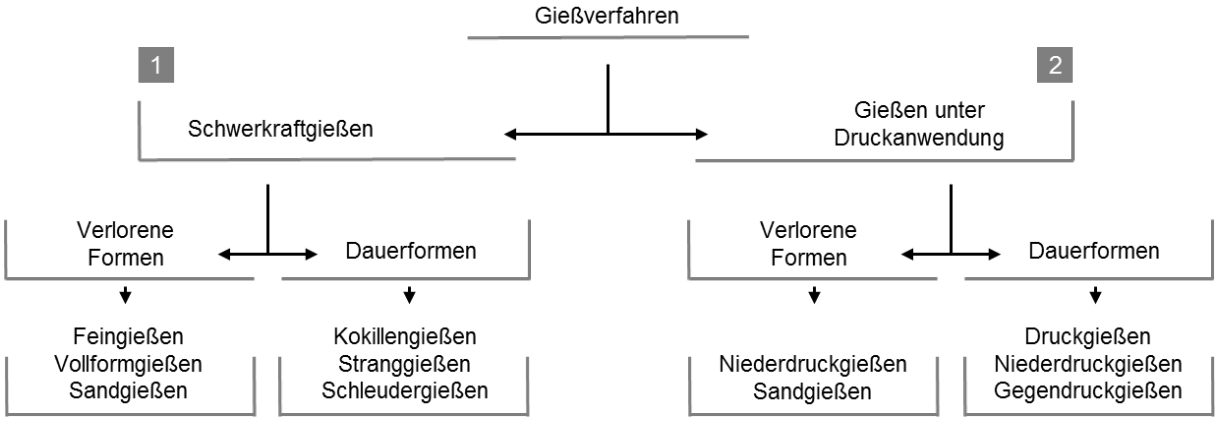

Abbildung 1-9. Gießverfahren im Überblick[151]

Prozess. Das Gießen steht in den betrachteten Prozessketten zur Herstellung von Aluminium und Kupfer am Ende der Produktion. Übergeordnet werden zwei Gießverfahren unterschieden: Der Guss kann entweder durch den Einsatz von Druck oder alleinig durch die Schwerkraft vorgenommen werden. Für das Gießen von Aluminium beispielsweise wurden im Jahr 2015 überwiegend auf Druck basierende Gießverfahren eingesetzt (Anteil von 57 Prozent aller Gießverfahren).[152] Ferner werden die Verfahren hinsichtlich der Gussformen unterschieden: zum einen werden Dauerformen eingesetzt, die mehrmalig verwendet werden, zum anderen „verlorene" Formen, die nur einmalig genutzt werden. Vergleicht man das Gießen mit dem vorangegangenen Schmelzprozess, entfallen nur etwa 10 bis 20 Prozent des Energieverbrauchs der Endproduktherstellung auf den Gießprozess (Schmelzen 40–55 Prozent).[153]

Bedarf an Rohstoffen und Zwischenprodukten. Als Ausgangsrohstoffe der NE-Metallgießereien werden u. a. die Produkte aus der Herstellung von Primär- und Sekundäraluminium, der Primär- und Sekundärkupfer und weiterer NE-Metalle verwendet. Je nach Aggregatszustand (fest, flüssig) müssen diese NE-Metalle zunächst eingeschmolzen werden.

Brennstoffbedarf. Der spezifische Brennstoffbedarf in NE-Gießereien beträgt etwa 2,1 MWh/t.[154] Für Aluminium-Gießereien wird der spezifische Brennstoffbedarf in (*Fleiter/Schlomann/Eichhammer*, 2013) mit 2,0 MWh/t Aluminium beziffert. Bei Leichtmetallgießereien (Aluminium) wird überwiegend Erdgas eingesetzt (etwa 90 Prozent). Da in NE-Metallgießereien hauptsächlich Aluminium gegossen wird (88 Prozent), kann von einem überwiegenden Erdgaseinsatz ausgegangen werden. Lediglich in einem Betrieb wird noch Kohle eingesetzt. Erdöl macht ca. 4,2 Prozent des Brennstoffbedarfs aus.[155] Der spezifische Brennstoffbedarf für das Gießen von Kupferprodukten ist nicht verfügbar. Jedoch wird auch in Buntmetallgießereien überwiegend Erdgas eingesetzt (etwa 80 Prozent).[156]

[151] Eigene Darstellung nach (*Wirtschaftsvereinigung Metalle*, 2018).

[152] *Wellner/Mählmann/Postler* (2016).

[153] *Bosse et al.* (2013).

[154]. Spezifischer Brennstoffverbrauch ermittelt aus Gesamtenergieverbrauch, Stromverbrauch und Produktionsmenge in (*Destatis*, 2016) und (*Wirtschaftsvereinigung Metalle*, 2018).

[155] *Destatis* (2016).

[156] *Destatis* (2016).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

Strombedarf. Der spezifische Strombedarf für die NE-Metallgießereien beträgt etwa 1,5 MWh/t.[157] Speziell für die Aluminium-Gießerei liegt er bei 1,6 MWh/t.[158] Insgesamt ergibt sich für die NE-Metallgießereien ein spezifischer Energieverbrauch von 3,6 MWh/t. In Abbildung 1-10[159] sind die absoluten Energieverbräuche für das Jahr 2015 aufgeschlüsselt nach Strom- und Brennstoffverbrauch dargestellt.

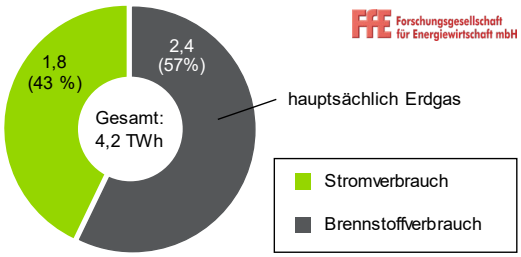

Abbildung 1-10. Absoluter Energieverbrauch der NE-Metallgießereien aufgeteilt nach Strom- und Brennstoffverbrauch für das Jahr 2015[159]

Emissionen. Spezifische Emissionen für NE-Metallgießereien liegen NE-Metallübergreifend nicht vor. Jedoch werden in Fleiter/Schlomann/Eichhammer (2013) spezifische THG-Emissionen von 1,5 t CO_2e/t Aluminiumguss angegeben. Da sowohl der Brennstoff- als auch der Strombedarf von Aluminiumgießereien mit dem Brennstoff- und Strombedarf der NE-Metallgießereien übereinstimmen,[160] wird von selbigen spezifischen Emissionen für die NE-Metallgießereien ausgegangen. In Tabelle 1-5 sind die absoluten Emissionen sowie der absolute Brennstoff- und Stromverbrauch der NE-Metallgießereien in Deutschland zusammengefasst.

Tabelle 1-5. Brennstoff- und Stromverbrauch sowie Emissionen von NE-Metallgießereien[161]

Produkt	Produktionsmenge Deutschland in kt	Brennstoffbedarf in TWh/a	Strombedarf in TWh/a	Emissionen in Mio. t CO_2e
NE-Metallgießereien	1.221	2,4	1,8	1,8
Aluminiumgießereien	1.072	2,1	1,7	1,6

[157] *Destatis* (2016).
[158] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013).
[159] *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018); *Destatis* (2016).
[160] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013); *Destatis* (2016).
[161] *Destatis* (2016); *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013); *Wirtschaftsvereinigung Metalle* (2018).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

1.3 Chancen und Herausforderungen durch die Energiewende

Im Rahmen der Energiewende ergeben sich Chancen und Herausforderungen für die NE-Metallindustrie, die es zu nutzen und zu bewältigen gilt. Vor allem die Umstellung von Primär- auf Sekundärproduktionsroute offeriert die Möglichkeit, deutlich weniger Energie einzusetzen und dadurch wirtschaftlicher zu agieren.[162] Sind jedoch aufwändige Sortierverfahren bei der Sekundärproduktion erforderlich, fällt die Energiedifferenz zwischen Primär- und Sekundärroute deutlich geringer aus. Die Recyclingquoten werden bei schwindenden Rohstoffreserven und im Sinne der Nachhaltigkeit langfristig eine entscheidende Rolle spielen.[163]

Neben dem Verfahrensroutenwechsel können innovative Klimaschutztechnologien sowohl THG-Emissionen vermindern, als auch wirtschaftlich im In- und Ausland vermarktet werden. Technologische THG-Vermeidungsoptionen sind jedoch industriespezifisch: Die Primäraluminiumherstellung bildet innerhalb der NE-Metallindustrie eine Ausnahme, da sie bereits zu mehr als 80 Prozent mit elektrischer Energie durchgeführt wird. Eine effektive THG-Vermeidung ist somit nur durch die Senkung indirekter Emissionen möglich. Infolge der nahezu vollständigen Elektrifizierung ist allerdings auch die Nutzung von Flexibilitätspotenzialen für die Bereitstellung von Regelleistung und die Glättung von Lastspitzen möglich. Die meisten anderen Prozesse der NE-Metallindustrie werden hingegen überwiegend mit Brennstoffen betrieben. Bei diesen Prozessen ist sowohl der Einsatz von Biomasse, als auch synthetischer Brennstoffe im Rahmen der Energiewende als Chance zu begreifen. Um ferner hybride Lösungen für die Flexibilität nutzen zu können, müssten diese Prozesse verstärkt elektrifiziert werden. Neben der Vermeidung energiebedingter Emissionen bietet beispielsweise der Einsatz inerter Anoden in der Aluminiumindustrie die Möglichkeit, prozessbedingte THG-Emissionen nennenswert zu reduzieren und Erlöse durch den Verkauf der Technologie zu erzielen.[164] In der Kupferindustrie trifft dies analog für den Einsatz der „flash converting“ Technologie zu.[165]

Neben diesen disruptiven Technologien bietet CCS bzw. CCU die Möglichkeit, prozessbedingte Emissionen in der NE-Metallindustrie zu vermindern. In diesem Zusammenhang ist jedoch auf Hemmnisse hinsichtlich der regulatorischen Rahmenbedingungen und der Akzeptanz von CCS bzw. CCU zu verweisen. Zur Nutzung geospezifischer Gegebenheiten im Rahmen der Energiewende sind einheitliche Aussagen aufgrund der weitläufigen Verteilung der NE-Metallindustrie nicht möglich.

Die NE-Metallindustrie ist als energieintensive Branche besonders auf wettbewerbsfähige und stabile energiepolitische Rahmenbedingungen angewiesen. Die Energiewende ist folglich auch mit Herausforderungen für die NE-Metallindustrie verbunden. Für die Prozesse der NE-Metallindustrie Primäraluminiumindustrie sind demgemäß stabile Strom- und Brennstoffpreise essentiell. Die Substitution von konventionellen durch synthetische Brennstoffe ist deshalb vor allem wirtschaftlich zu hinterfragen. In diesem Zusammenhang ist auch die Aufrechterhaltung des im Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) verankerten „Besonderen Ausgleichsregelung“ für energieintensive Industrien wichtig. Die stete Verfügbarkeit von Energie ist zudem essentiell für die NE-Metallindustrie. Bei einem Stromausfall von mehr als vier Stunden würden beispielsweise die meisten Aluminiumelektrolyseanlagen irreparabel zerstört werden.[166] Um den Verfahrensroutenwechsel hin zu einer verstärkten Sekundärproduktion im Rahmen der Energiewende zu bewältigen, sind geeignete Ausgangsmaterialien erforderlich. Diese stehen oft nicht in adäquatem Umfang zur Verfügung. Auch bei dem Einsatz innovativer Technologien ergeben sich wirtschaftliche und technische Hindernisse: Beispielsweise benötigt der Einsatz der inerten Anodentechnologie noch einigen Forschungsbedarf. Eine Kommerzialisierung der Technologie ist nicht sicher und frühestens im Jahr 2050 zu erwarten.[167] Auch bei anderen Klimaschutztechnologien ist die Verfügbarkeit nicht vorherzusehen und eine

[162] *Fleiter/Schlomann/Eichhammer* (2013); *Moya u. a.* (2015).
[163] *Moya u. a.* (2015); *Dessart/Francois J./et al.* (2017); *Moss/et al.* (2013).
[164] *Moya u. a.* (2015).
[165] *Dedehayir/et al.* (2014); *Kojo/Ilkka et al.* (2009); *Habashi* (2007).
[166] *Wietschel/Ullrich* (2015); *Moll* (2013); *Arnold* (2012).
[167] *Moya u. a.* (2015).

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

flächendeckende Durchdringung keineswegs gewährleistet. Lange Investitionszyklen und hohe Neuinvestitionskosten für Anlagen erschweren den Technologiewandel.

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

2. LITERATURVERZEICHNIS

(2017): 2015 Minerals Yearbook: Copper [Advance release], Reston (Virginia): U.S. Geological Survey, 2017

AOS (2017): Produktion: Wir über uns, <http://www.aos-stade.de/pages/produktion/main-wiruberuns.html> [Zugriff 2018-07-19]

Arnold, Heinz (2012): Trimet Aluminium: »Wir brauchen dringend die Abschaltverordnung!«, <https://www.smarterworld.de/smart-energy/sonstige/artikel/89092/> [Zugriff 2018-07-19]

Bauknecht, Dierk u. a. (2016): Systematischer Vergleich von Flexibilitäts- und Speicheroptionen im deutschen Stromsystem zur Integration von erneuerbaren Energien und Analyse entsprechender Rahmenbedingungen, Freiburg/Darmstadt, <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Systematischer_Vergleich_Flexibilitaetsoptionen.pdf> [Zugriff 2018-07-17]

BDE u. a. (2018): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2018: Einblicke und Aussichten, <https://www.vku.de/fileadmin/user_upload/Statusbericht_2018_Ansicht_und_Druck.pdf> [Zugriff 2018-07-18]

Bosse et al. (2013): Ermittlung von branchenspezifischen Potentialen zum Einsatz von erneuerbaren Energien in besonders energieintensiven Industriesektoren am Beispiel der Gießerei-Industrie, Dessau-Roßlau

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2013): Aluminium / Bauxit: Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe, Hannover

Dedehayir, Ozgur/et al. (2014): Disruptive innovations in complex product systems industries: A case study., Leiden, Tampere

Dessart/Francois J./et al. (2017): Non-ferrous Metals Manufacturing: Vision for 2050 and Actions Needed, Luxembourg

Destatis (2016): Erhebung über die Energieverwendung der Betriebe des Verarb. Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden: Tabelle 2: Energieverbrauch nach Energieträgern

Ecofys (2016): Flex-Efficiency: Ein Konzept zur Integration von Effizienz und Flexibilität bei industriellen Verbrauchern [Zugriff 2017-09-27]

enArgus (2017a): Primärkupferherstellung, <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d2411645-2/*/*/Prim%C3%A4rkupferherstellung.html?op=Wiki.getwiki&search=Meeresenergie&scope=all> [Zugriff 2018-07-19]

– (2017b): Sekundäraluminiumherstellung, <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d2411909-2/*/*/Sekund%c3%a4raluminiumherstellung.html?op=Wiki.getwiki&search=Meeresenergie&scope=all> [Zugriff 2018-07-19]

– (2017c): Sekundärkupferherstellung, <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d2411919-2/*/*/Sekund%c3%a4rkupferherstellung.html?search=Sekund%c3%a4rkupfer&scope=all&op=Wiki.getwiki> [Zugriff 2018-07-19]

Energieblog, Der (2015): Demand Side Management: „Da können wir zeigen, was wir drauf haben.“: Ein Interview mit Dr. Martin Iffert der TRIMET Aluminium SE, in: Becker Büttner Held Part GmbH (2015)

European Aluminium (2018a): Aluminium Production by segment in Europe, <https://www.european-aluminium.eu/data/economic-data/aluminium-production-by-segment-in-europe/> [Zugriff 2018-07-19]

– (2018b): European overview: Aluminium plants location, <https://www.european-aluminium.eu/data/industry-overview/european-overview-aluminium-plants-location/> [Zugriff 2018-07-19]

European Copper Institute (Hrsg.) (2014): Copper's Contribution to a Low-Carbon Future: A Plan to Decarbonise Europe by 25 Percent, <https://www.kme.com/fileadmin/NEWS___EVENTS/ECI_Coppers_Contribution_To_A_Low_Carbon_Future.pdf>

Fleiter, Tobias/Schlomann, Barbara/Eichhammer, Wolfgang (Hrsg.) (2013): Energieverbrauch und CO2-Emissionen industrieller Prozesstechnologien: Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente, Stuttgart: Fraunhofer-Verl., 2013

Focken, Ulrich/Bümmerstede, Jens/Klobasa, Marian (2011): Kurz- bis Mittelfristig realisierbare Marktpotenziale für die Anwendung von Demand Response im gewerblichen Sektor, Karlsruhe

Fottner, Johannes/Handrich, Wolfgang (19999): Automatisierte Prozesse in der Schüttgutförderung

Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (Hrsg.) (2017): Stichwort: Elektrolyse-Zelle - Aluminium Lexikon - der Werkstoff von A-Z, <http://www.aluinfo.de/aluminium-lexikon-detail.html?id=24&letter=e> [Zugriff 2017-05-30]

Götz, Werner u. a. (2017): Präqualifizierte Anbieter je Regelenergieart.

Grave, Katharina u. a. (2015): Stromkosten der energieintensiven Industrie - Ein internationaler Vergleich., Berlin

Grimes, Sue/Donaldson, John/Cebrian Gomez, Gabriel (2008): Report on the Environmental Benefits of Recycling, Brussels

Gruber, Anna/Roon, Serafin von/Fattler, Steffen (2016): Wissenschaftliche Projektbegleitung des Projektes DSM-Bayern, <http://www.dsm-bayern.de/fileadmin/content/Downloads/Begleitforschung/160809_Wissenschaftliche_Projektbegleitung_DSM-Bayern_final.pdf> [Zugriff 2018-07-19]

Gruber, Anna-Maria (2017): Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien, Dissertation, 2017

Habashi, Fathi (2007): Copper metallurgy at the crossroads, Quebec City

Hauck, Heribert (2013): Aluminiumelektrolyse als virtueller Stromspeicher - ein Beitrag zum Gelingen der Energiewende [Zugriff 2018-07-17]

– (2016): Aluminiumelektrolyse als virtueller Stromspeicher

Hauck, Heribert, TRIMET Aluminium SE (2017): Email-Aluminiumelektrolyse, Essen

Hydro (2016): Primärproduktion, <https://www.hydro.com/de/hydro-in-deutschland/uber-aluminium/aluminium-lebenszyklus/Primarproduktion/> [Zugriff 2018-07-19]

Kammer, Catrin (2009): Aluminium Taschenbuch 1., Düsseldorf: Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikatio GmbH, 2009

Kickshinrichs, W./Poganietz, W. R.: 2006_Alu. Supply and international trade_Kuckshinrichs

Klobasa, Marian (2007): Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten, Dissertation

Kojo/Ilkka et al. (2009): Flash converting - sustainable technology now and in the future., Espoo:

Köpke, Ralf (2013): Trimet setzt auf virtuelle Batterie, <https://www.energie-und-management.de/nachrichten/detail/trimet-setzt-auf-virtuelle-batterie-101495> [Zugriff 2018-07-19]

Langrock, Thomas (2015): Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungs-system mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien 1862-4359, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_19_2015_potentiale_regelbarer_lasten.pdf>

Lickfett, Heiko (2018a): Branche in Zahlen, <https://www.bdguss.de/branche/die-branche-in-zahlen/> [Zugriff 2018-04-20]

– (2018b): Die Gießerei-Industrie in Deutschland: Mittelstand mit Schlüsselfunktion, <https://www.bdguss.de/branche/rolle-bedeutung/> [Zugriff 2018-07-19]

Moll, Kai (2013): Trimet: deutsche Aluhütten können Stromspeicherkapazität, <http://metals.mbi-infosource.de/trimet-deutsche-aluhutten-konnen-strompeicherkapazit/>

©2020 Navigant Energy Germany GmbH

Moss, Ray/et al. (2013): Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector, Petten
Moya, Jose A. u. a. (2015): Energy efficiency and GHG emissions: Prospective scenarios for the aluminium industry, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015
Norsk Hydro ASA (2017): Annual Report 2016, <https://hydro.com/globalassets/1-english/investor-relations/annual-report/2016/downloads/annual-report-2016.pdf>
Nübold, Wolfgang (2017): „Virtuelle Batterie" der TRIMET wird Teil der KlimaExpo.NRW, <https://www.trimet.eu/de/presse/pressemitteilungen/2017/2017-01-13-virtuelle-batterie-der-trimet-wird-teil-der-klimaexpo.nrw?id=6> [Zugriff 2018-07-19]
Ostermann, Friedrich (2014): Anwendungstechnologie Aluminium, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014
Paulus, Moritz/Borggrefe, Frieder (2011): The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany, in: Applied Energy 88 (2011), S. 432–441, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.017#
Pohling, Rolf (2015): Chemische Reaktionen in der Wasseranalyse, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015
Scheben, Mathias (2011): Das Geschäftsjahr 2010/11: Hohe Nachfrage sorgt für Vollauslastung und Umsatzsteigerung, <https://www.trimet.eu/de/presse/pressemitteilungen/2011/20110914_das_geschaeftsjahr_2010_11__hohe_nachfrage_sorgt_fuer_vollauslastung_und_umsatzsteigerung> [Zugriff 2018-07-19]
– (2014): Sie möchten mit einem etablierten Unternehmen arbeiten – wir sind seit 1985 am Markt, <https://www.trimet.eu/de/ueber_trimet/historie> [Zugriff 2018-07-19]
Scheven, Alexander von (2015): Flexibilitätsoptionen im industriellen Umfeld an verschiedenen Energiehandelsmarktplätzen im Smart Grid, Dissertation, Darmstadt
Scheven, Alexander von/Hartkopf, Thomas/Prelle, Martin (2012): Lastmanagementpotenziale der stromintensiven Industrie zur Maximierung des Anteils regenerativer Energien im bezogenen Strommix: Endbericht, Darmstadt
Schmidthaler, Michael u. a. (2014): Lastverschiebung in der Industrie: Projektbericht 4/9, <https://www.energieforschung.at/assets/project/downloads/Loadshift-Potentiale-in-der-Industrie.pdf> [Zugriff 2018-07-19]
Scholz, Yvonne u. a. (2014): Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher: verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil flukturierender erneuerbarer Stromerzeugung, Stuttgart
Steurer, Martin u. a. (2013): Identifikation und Bewertung des intelligenten Lastmanagementpotenzials in der Industrie in Baden-Württemberg: Studie
Steurer, Martin u. a. (2015): Identifikation und Realisierung wirtschaftlicher Potenziale für Demand Side Integration in der Industrie in Deutschland, Aachen
TRIMET Aluminium SE (2015): Geschäftsbericht 2014/15, <https://www.trimet.eu/de/geschaeftsberichte/trimet-geschaeftsbericht-2015.pdf> [Zugriff 2018-07-17]
Wellner, Christian/Mählmann, Hinrich/Postler, Andreas (2016): GDA Jahresbericht 2016, Düsseldorf, <http://www.aluinfo.de/files/_media/dokumente/Downloads/Jahresberichte/2016_GDA_Jahresbericht.pdf> [Zugriff 2018-07-17]
Wietschel, Martin/Ullrich, Sandra Johanna (Hrsg.) (2015): Energietechnologien der Zukunft: Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015
Wille-Haussmann, Bernhard/Erge, Thomas/Klobasa, Marian (2009): Integration von Windenergie in ein zukünftiges Energiesystem unterstützt durch Lastmanagement.
Wirtschaftsvereinigung Metalle (Hrsg.) (2018): Metallstatistik 2017
WVM (2018): Die NE-Metalle., <https://www.wvmetalle.de/die-ne-metalle/> [Zugriff 2018-06-07]

©2020 Navigant Energy Germany GmbH