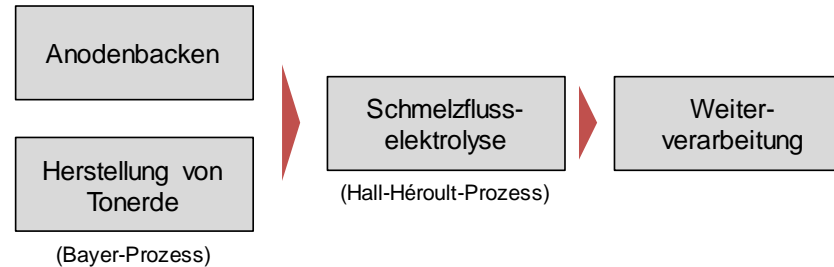


CO₂-Verminderung in der Primäraluminiumherstellung

22.01.2018

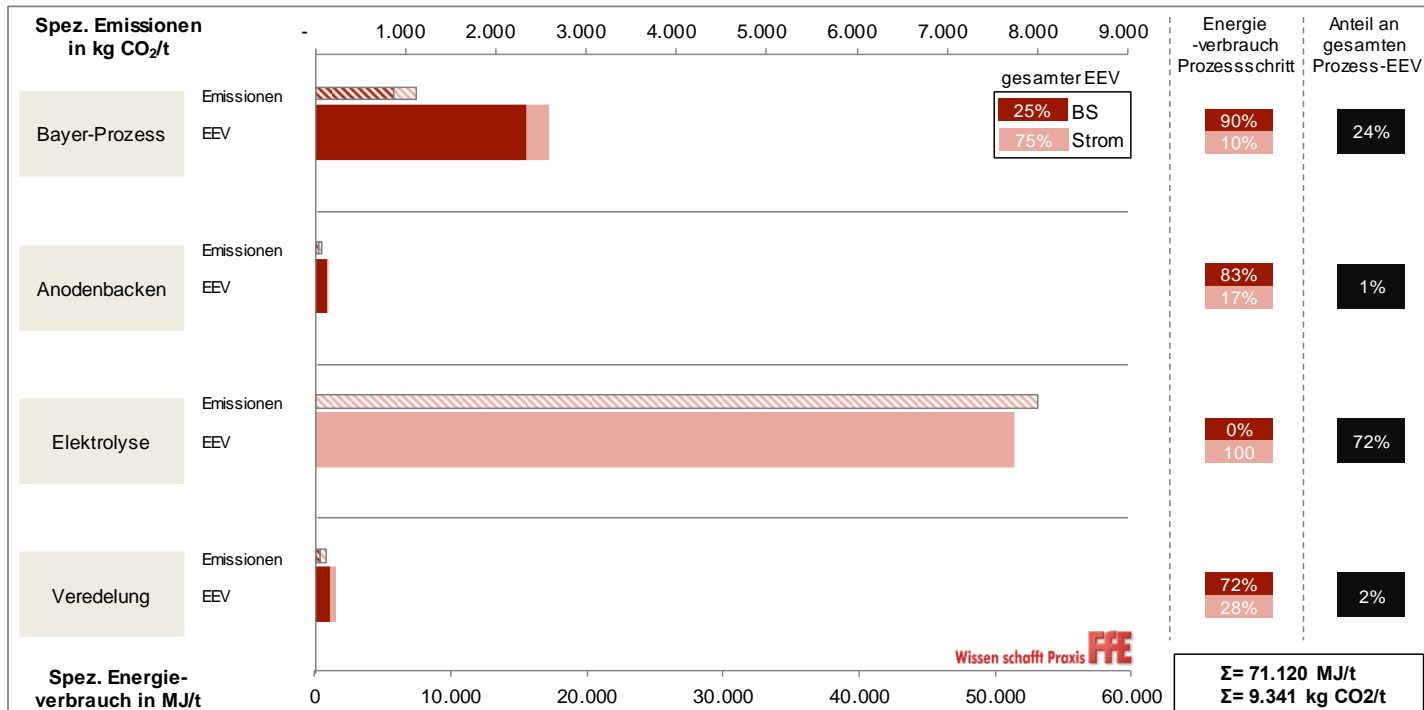


Prozessbeschreibung:

Die Herstellung von Primäraluminium lässt sich in vier wesentliche Prozessschritte unterteilen. Den ersten Prozessschritt stellt die Herstellung von Tonerde (Aluminiumoxid) in Raffinerien aus Bauxit, dem einzigen Aluminiumerz, welches für die kommerzielle Produktion von Aluminium verwendet wird, dar. Mittels des Bayer-Verfahrens wird Bauxit in möglichst reines Aluminiumoxid überführt. Dabei wird Letzteres unter Zugabe von Natronlauge und Kalk aus dem Bauxit aufgeschlossen. Anschließend wird die Lauge ausgewaschen und das gewonnene Aluminiumhydroxid in einem Drehrohrföfen bei Temperaturen von 1.200-1.300° C kalziniert. Es entsteht Aluminiumoxid, welches den Ausgangsstoff der Schmelzflusselektrolyse bildet. /OST 02 14/, /HYD 01 12/ Bei der Herstellung von Aluminiumoxid in modernen Anlagen werden 7-10 GJ Wärme pro Tonne Aluminiumoxid verbraucht /AOS 01 17/. In Deutschland gibt es derzeit lediglich ein Werk zur Herstellung von Aluminiumoxid, weshalb ein großer Teil des gebrauchten Aluminiumoxids importiert wird /BGR 01 13/, /AOS 01 17/. In diesem Vorhaben wird die Herstellung von Aluminiumoxid in Deutschland betrachtet. Für die Herstellung von einer Tonne Primäraluminium werden ca. zwei Tonnen Aluminiumoxid und damit vier bis sieben Tonnen Bauxit benötigt. /KUP 01 07/, /FFE 34 17/ Der zweite Eingangsstoff der Schmelzflusselektrolyse stellen Anoden dar. Diese werden in Anodenfabriken aus einer Mischung von kalzinierten Petrolkoks, Teerpech sowie den Resten ungenutzter Anodenenden hergestellt /FFE 34 17/, /IALI 01 17/.

Der zweite Prozessschritt stellt die Gewinnung von Primäraluminium aus den mineralischen Rohstoffen mittels der Schmelzflusselektrolyse nach Hall-Héroult dar. Hierbei handelt es sich um ein elektrochemisches Reduktionsverfahren, welches heutzutage die einzig industriell angewendete Prozesstechnologie zur Primäraluminiumherstellung darstellt /FFE 34 17/. Die Reduktion zu Aluminium erfolgt in den Elektrolyseöfen (ausgekleidete Stahlwannen) durch das Anlegen einer Gleichspannung von ca. vier bis fünf Volt zwischen Anode und Kathode. Der Stromfluss hat dabei einerseits den Zweck, die Wannentemperatur konstant zu halten, und bewirkt zum anderen den chemischen Vorgang der Elektrolyse. /GVA 01 17/ Als Elektrolyt im Elektrolyseofen wird geschmolzenes Kryolith eingesetzt. Die Schmelztemperatur des Aluminiumoxids sinkt dadurch stark, sodass die Reduktion bei einem Temperaturniveau von ca. 950-970° C erfolgen kann. Das flüssige Aluminium, welches spezifisch schwerer ist als der Elektrolyt, sammelt sich am Wannensboden und fungiert hierbei als Kathode /OST 02 14/. Die Anoden bestehen aus vorgebrannten Blöcken aus Petrolkoks und Teerpech und werden durch das Verfahren aufgebraucht. Dies kommt daher, dass sie mit dem durch die Reaktion freiwerdenden Sauerstoff des Aluminiumoxids zu Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO₂) reagieren. Diese Treibhausgase stellen prozessbedingte Emissionen dar und werden nachfolgend nicht weiter betrachtet. Pro Tonne Primäraluminium werden zwischen 0,42 und 0,45 t Anodenmaterial verbraucht /GVA 01 17/. Da sich die Anoden aufgrund ihrer volatilen Bestandteile noch nicht für die Schmelzflusselektrolyse eignen, werden die sog. „grünen“ Anoden teilweise in den Aluminiumhütten weiter aufbereitet und bei einer Temperatur von ca. 1.200-1.280° C bis zu 48 Stunden gebrannt /GDMB 01 16/, /FFE 34 17/.

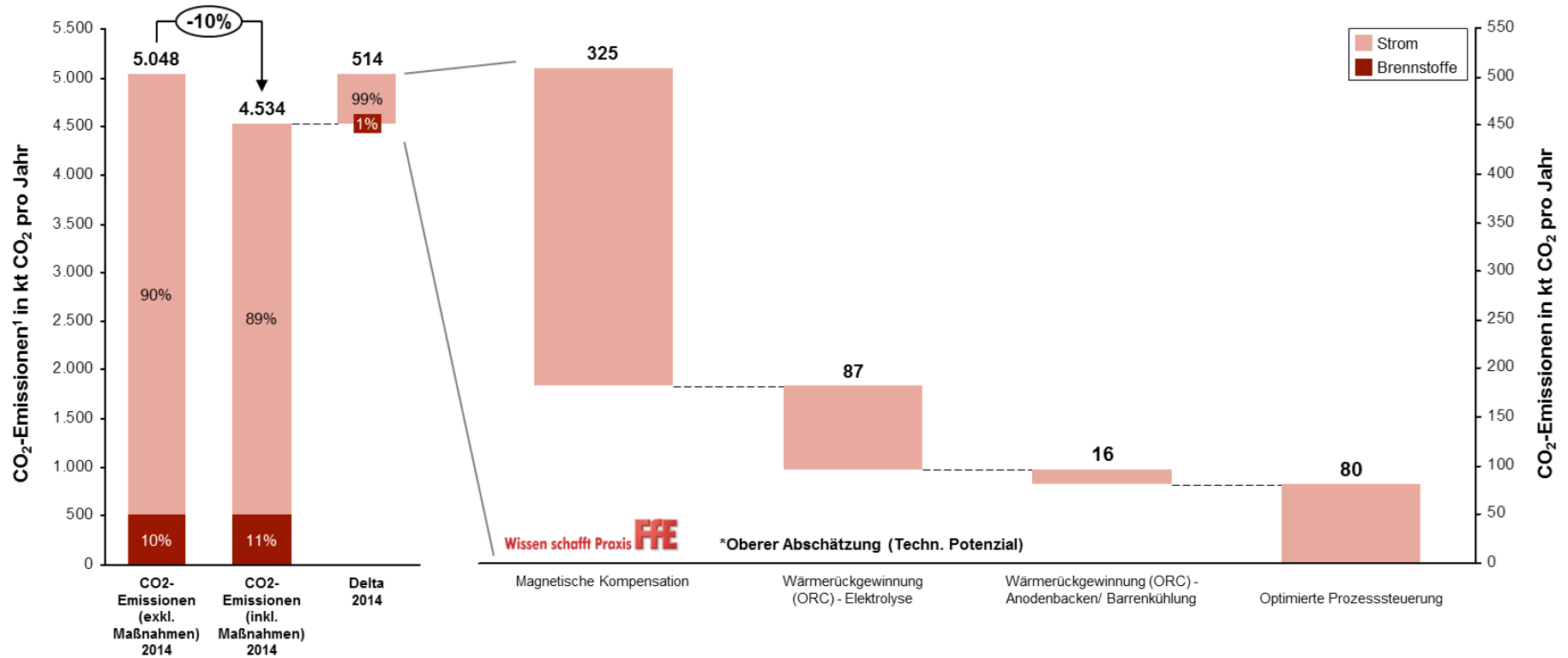
Spezifischer Energieverbrauch in MJ/t und spezifische CO₂-Emissionen in kg CO₂/t der Primäraluminiumherstellung



- **Bayer-Prozess**
- Durchschnittlicher Energieverbrauch von ca. 17.000 MJ pro Tonne Aluminiumoxid in 2014
- Deckung des Energiebedarfs zu ca. 90 % über Brennstoffe und zu ca. 3 % über Strom
- Durchschnittliche energiebedingte CO₂-Emissionen von ca. 570 kg pro Tonne Aluminiumoxid in 2014

- **Elektrolyse**
- Durchschnittlicher Energieverbrauch von ca. 51.000 MJ pro Tonne Primäraluminium in 2014
- Deckung des Energiebedarfs ausschließlich über Strom
- Durchschnittliche energiebedingte CO₂-Emissionen von ca. 8.170 kg pro Tonne Primäraluminium in 2014

Auswirkungen quantifizierter* CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die CO₂-Emissionen in der Primäraluminiumherstellung



¹ Emissionen berücksichtigen Bayer-Prozess, Elektrolyse, Anodenbacken und Weiterverarbeitung

* Hier werden Wechselwirkungen nicht berücksichtigt. Das Potenzial der einzelnen Maßnahmen kann nicht aufsummiert werden

Herleitung des maximalen technischen CO₂-Verminderungspotenzials der Effizienzmaßnahmen in der Primäraluminiumherstellung (1)

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Maximales technisches Potenzial und Zukunftsfähigkeit
Magnetische Kompensation (Elektrolyse)	Die sehr hohe Stromstärke, welche bei der Schmelzflusselektrolyse angelegt wird, erzeugt starke Magnetfelder (Gleichstromfeld). Diese haben unter anderem einen störenden Einfluss auf das Betriebsverhalten der Elektrolysezelle, was zu einem steigenden Energieverbrauch führt. Ziel der magnetischen Kompensation ist es, durch ein entsprechendes Gegenfeld, den Einfluss des Prozessstroms möglichst zu neutralisieren. /FFE-34 17/, /JRC-01 15/	<p><i>Maximales technisches Potenzial: 300 kt CO₂/a</i></p> <p><i>Herleitung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Strom: 1.070 kWh / t Primäraluminium /FFE-34 17/ - Anwendungsfaktor: 100 % /FFE-34 17/
Wärmerückgewinnung (ORC) - (Elektrolyse)	<p>Strom, welcher aus industrieller Abwärme gewonnen wird, ist gleichsam emissionsfrei. Durch den Organic Rankine Cycle (ORC) kann bereits bei relativ geringen Temperaturniveaus (ab 70 bis 80 °C) Strom aus Wärme erzeugt werden. Daher bietet sich ORC vor allem auch zur Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen an. /QUO-01 13/</p> <p>Hier werden die Abgas- und Seitenwand-Abwärme aus der Elektrolysewanne genutzt. <u>Annahme:</u> Das ausgewiesene Potenzial stellt den Energieanteil dar, welcher nicht gleichzeitig für interne Anwendungen wie Aluminiumoxid- oder Anodenvorwärmung benötigt wird bzw. danach noch zur Verfügung steht. Restliche Wärmequellen, wie Aluminium-Kühlwasser oder Kompressorenwärme, werden zur Deckung des internen Wärmebedarfs verwendet (z. B. Speisewasservorwärmung oder Raumwärmeerzeugung).</p>	<p><i>Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO₂/a</i></p> <p><i>Herleitung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Strom: 286 kWh / t Primäraluminium, Annahme basierend auf /TMS-01 12/ - Anwendungsfaktor: 100 % /FFE-34 17/
Wärmerückgewinnung (ORC) – (Anodenbacken / Barrenkühlung)	<p>Strom, welcher aus industrieller Abwärme gewonnen wird, ist gleichsam emissionsfrei. Durch den Organic Rankine Cycle (ORC) kann bereits bei relativ geringen Temperaturniveaus (ab 70 bis 80 °C) Strom aus Wärme erzeugt werden. Daher bietet sich ORC vor allem auch zur Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen an. /QUO-01 13/</p> <p>Hier wird die Abgasabwärme des Anodenbrennens genutzt. Die Anoden werden, obwohl anderswo hergestellt, teilweise noch in den Aluminiumhütten fertig gebrannt /FFE-34 17/. Außerdem wird die Abwärme der Aluminiumbarren-Abkühlung berücksichtigt.</p>	<p><i>Maximales technisches Potenzial: <100 kt CO₂/a</i></p> <p><i>Herleitung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Strom: 51 kWh / t Primäraluminium, Annahme basierend auf /TMS-01 12/ - Anwendungsfaktor: 100 % /FFE-34 17/
Optimierte Prozesssteuerung (durch Messtechnik) (Elektrolyse)	Die optimierte Prozesssteuerung umfasst ein Prozess- und Führungskonzept basierend auf moderner Messtechnik (sog. super-heat Messgeräte). Dadurch kann die Temperatur im Inneren der Elektrolysewanne in Echtzeit gemessen und geregelt werden. Hierdurch ergeben sich geringere Energieverbräuche. /FFE 34 17/	<p><i>Maximales technisches Potenzial: 100 kt CO₂/a</i></p> <p><i>Herleitung:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Einsparpotenzial Strom: 713 kWh / t Primäraluminium /FFE-34 17/ - Anwendungsfaktor: 37,1 % /FFE-34 17/

Herleitung des maximalen technischen CO₂-Verminderungspotenzials der Effizienzmaßnahmen in der Primäraluminiumherstellung (2)

(keine Potenzialbestimmung):		
Bipolare Elektrolysezellen (Elektrolyse)	<p>Gemeinsamer Einsatz von Inertanoden und benetzbaren Kathoden innerhalb der Elektrolysezelle.</p> <p>Inertanoden: Im Gegensatz zu den heutzutage verwendeten Anoden werden Inertanoden nicht verbraucht und eine CO₂-Verminderung durch den wegfallenden Anodenherstellungsprozess realisiert. (Forschung seit 1970) /WIE-01 15/</p> <p>Benetzbare Kathoden: Durch benetzbare Kathoden kann der Anoden-Kathoden-Abstand und somit der Energieverbrauch der Elektrolyse verringert werden. (Forschung seit 1970) /KLIEN-01 14/</p>	<i>Umsetzung im industriellen Maßstab sehr unwahrscheinlich /FFE 34 17/, lediglich als radikale Prozessverbesserung durch die Forschung möglich, daher kein technisches Einsparungspotenzial ausgewiesen</i>
Carbothermischer Herstellungsprozess (Elektrolyse)	Stromsenkung der Aluminiumelektrolyse; Prozess noch im Entwicklungsstadium /KLIEN-01 14/	<i>Entwicklungsstadium /KLIEN-01 14/</i>
Flexibilisierung der Produktion (Elektrolyse)	<p>Aufgrund des hohen Stromverbrauchs bietet die Primäraluminium-Elektrolyse großes Potenzial zur CO₂-Verminderung mittels Flexibilisierung. Die CO₂-Verminderung ergibt sich dadurch, dass der Energieverbrauch in Zeiten hoher Einspeisung von Erneuerbarer Energien erfolgt (hierzu muss allerdings die Emissionsberechnung dynamisch sein). Durch die Flexibilisierung entstehen bedeutende virtuelle Speicherkapazitäten. /FFE 34 17/</p> <p>Allerdings finden Flexibilisierungsoptionen in der vorliegenden Studie keine Berücksichtigung als CO₂-Verminderungsmaßnahme.</p>	<i>n.a.</i>
Alle Maßnahmen	Summe der Maßnahmen	Maximales technisches Potenzial: 514 kt CO₂/a

- AOS-01 17** Produktion - Wir über uns in: <http://www.aos-stade.de/pages/produktion/main-wiruberuns.html> (Abruf: 25.05.2017) Archived by WebCite® at: <http://www.webcitation.org/6qisvWprd>. Stade: Aluminium Oxid Stade GmbH, 2017
- BGR-01 13** Aluminium / Bauxit - Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2013
- EOLB-02 08** Worrell, Ernst; Price, Lynn; Neelis, Maarten; Galitsky, Christina; Nan, Zhou: World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors. Berkeley, Kalifornien: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Lab, 2008
- FFE-34 17** Hauck, Heribert (Trimet Aluminium SE): Experteninterview am 10.03.2017 - CO₂-Verminderung bei der Herstellung von Primäraluminium. München: FfE GmbH, 2017
- FMAW-01 12** Balomenos, Efthymios et al.: Energieeffizienz in der Al-Gewinnung: Hall-Héroult-Prozess vs carbothermische Reduktion in: Energieeffizienz in der Metallurgie : Vorträge beim 45. Metallurgischen Seminar des Fachausschusses für Metallurgische Aus- und Weiterbildung der GDMB vom 23. - 25. Mai 2012 in Ulm. Freiberg: Fachausschuss für Metallurgische Aus- und Weiterbildung der GDMB, 2012
- GDMB-01 16** Pawlek, Rudolf P.: Tagung des Fachausschusses Leichtmetalle der GDMB in Neuss 2015 in: World of Metallurgy – ERZMETALL 69 (2016) No. 1. Clausthal-Zellerfeld: GDMB Verlag GmbH, 2016
- GVA-01 17** Stichwort: Elektrolyse-Zelle - Aluminium Lexikon - der Werkstoff von A-Z in: <http://www.aluinfo.de/aluminium-lexikon-detail.html?id=24&letter=e> (Abruf: 30.05.2017) Archived by WebCite® at: <http://www.webcitation.org/6qsGhWrDj>. Düsseldorf: Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., 2017
- HYD-01 12** Aluminium, environment and society. Oslo: Norsk Hydro ASA, 2012
- IALI-01 17** Anode production in: <http://primary.world-aluminium.org/processes/anode-production/> (Abruf: 30.05.2017) Archived by WebCite® at: <http://www.webcitation.org/6qsH6UOG3>. London: International Aluminium Institute, 2017
- JRC-01 15** Moya, J.A et al.: Energy Efficiency and GHG Emissions: Prospective Scenarios for the Aluminium Industry. Bruxelles: Europäische Kommission, 2015

- KEL-01 13** Keller, Felix; Sulger, Peter O.; Meier, Markus W.; Severo, Dagoberto S.; Vanderlei, Gusberti: Specific Energy Consumption in Anode Bake Furnaces in: Essential Readings in Light Metals: Electrode Technology for Aluminum Production, Volume 4. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013
- KLIEN-01 14** Roadmap Industrie F&E-Fahrplan Energieeffizienz in der energieintensiven Industrie - Energieeffizienz in der Nichteisenmetall-Industrie. Wien: Klima- und Energiefonds der österreichischen Bundesregierung, 2014
- KUP-01 07** Munster, Frank: Rotschlamm: Reststoff aus der Aluminiumoxidproduktion - Ökologischer Rucksack oder Input für Produktionsprozesse. Kassel: Kassel University Press GmbH, 2007
- OST-02 14** Ostermann, Friedrich: Anwendungstechnologie Aluminium - Gewinnung, Recycling, Ökologie in: VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014
- QUO-01 13** Quoilin, Sylvain et al.: Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems in: Renewable & Sustainable Energy Reviews (Volume 22, Pages 168-186). Amsterdam: Elsevier, 2013
- TMS-01 12**
- UBA-02 16** Icha, Petra: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA), 2016
- UBA-13 16** Juhrich, Kristina: CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2016
- WIE-01 15** Wietschel, Martin et al.: Energietechnologien der Zukunft - Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015
- WVM-01 16** Die Statistik der Nichteisen-Metallindustrie 15.16. Berlin: Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVM), 2016