

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Gigafactories für Lithium-Ionen-Zellen – Rohstoffbedarfe für die globale Elektromobilität bis 2050

Kurzstudie erstellt im Rahmen des BMBF-
Verbundprojektes Fab4Lib - Erforschung von Maßnahmen
zur Steigerung der Material- und Prozesseffizienz in der
Lithium-Ionen-Batteriezellproduktion über die gesamte
Wertschöpfungskette

Darmstadt,
16.01.2019

Autorinnen und Autoren

Dr. Matthias Buchert
Peter Dolega
Stefanie Degreif

Öko-Institut e.V.

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis	5
Zusammenfassung	7
Summary	8
1. Einleitung & Hintergrund	9
2. Szenarien	9
2.1. Übersicht über aktuelle Mobilitätsszenarien	9
2.2. Methodik	10
2.3. Ergebnisse	10
3. Benötigte Batteriekapazitäten in Gigawatt-Stunden	14
4. Rohstoffbedarfe der Lithium-Ionen-Zellen	15
4.1. Lithium	15
4.2. Kobalt	16
4.3. Nickel	17
4.4. Einordnung des Rohstoffbedarfs der Elektromobilität	18
5. Fazit und Ausblick	19
6. Referenzen	20
7. Anhang	22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: PKW 2DS (IEA 2017) – Verkauf (links) und Bestand (rechts) in Millionen pro Jahr	11
Abbildung 2: PKW B2DS (IEA 2017) – Verkauf (links) und Bestand (rechts) in Millionen pro Jahr	12
Abbildung 3: Entwicklung der Verkaufszahlen im B2DS Szenario nach Typ und Antrieb (in Millionen verkaufter Einheiten)	13
Abbildung 4: Projizierter jährlicher GWh-Bedarf der globalen Elektromobilität	14
Abbildung 5: Rohstoffbedarf in Tonnen Lithium im B2DS Szenario	16
Abbildung 6: Rohstoffbedarf in Tonnen Kobalt im B2DS Szenario	16
Abbildung 7: Rohstoffbedarf in Tonnen Nickel im B2DS Szenario	17

Abkürzungsverzeichnis

2DS	2-Grad-Ziel Szenario der IEA
B2DS	beyond two degrees Szenario der IEA (1,75-Grad-Ziel Szenario)
BEV	vollelektrische Pkw
Co	Kobalt
Cu	Kupfer
FCEV	Brennstoffzellen-Pkw
GWh	Gigawattstunde(n)
HEV	Hybrid-Pkw
HFT	heavy freight trucks
ICE	Pkw mit Verbrennungsmotoren
kWh	Kilowattstunde(n)
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat Kathode
Li	Lithium
LMO	Lithium-Mangan-Oxid-Spinell Kathode
MFT	medium freight trucks
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid Kathode
Ni	Nickel
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt -Oxid Kathode
PHEV	Plug-in-Hybrid-Pkw
Si	Silizium

Zusammenfassung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes Fab4Lib hat das Öko-Institut auf Basis der neuesten Mobilitätsszenarien der IEA und mit Unterstützung der Verbundpartner hinsichtlich der Entwicklung der Batterietypen und Batteriekapazitäten die globalen Rohstoffbedarfe von Schlüsselmaterialien für Lithium-Ionen-Zellen bis 2050 berechnet.

Anhand jährlicher Verkaufszahlen unterschiedlicher Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebstoppen werden die Bedarfe für Schlüsselrohstoffe der Batterien errechnet. Zum einen wird ein 2DS Szenario betrachtet, welches auf eine maximale Temperaturerhöhung von 2 °C bis 2100 abzielt und ein noch optimistischeres B2DS Szenario, welchem die Ziele des Pariser Klimaabkommens zugrunde liegen.

In beiden Szenarien ist ein rapider Zuwachs elektrischer Fahrzeuge festzustellen. Im 2DS Szenario sind im Jahr 2030 mehr als ein Drittel der Pkw zumindest teilweise elektrisch, bis 2050 steigt der Wert auf etwa 80 % alternativer Antriebe. Im B2DS Szenario sind im Jahr 2030 bereits die Hälfte der Pkw mit alternativen Antrieben versehen und bis 2050 werden keine Verbrenner Pkw mehr verkauft. Insgesamt werden über alle Fahrzeugtypen hinweg deutliche Zuwächse von batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen verzeichnet.

Basierend auf den aktuellsten Publikationen und Diskussionen mit Experten aus der Industrie und Wissenschaft wurden Batteriekapazitäten abhängig von Fahrzeug, Antrieb und Stützjahr definiert. In Summe ergibt sich im Jahr 2030 ein globaler Bedarf von 1.000 GWh Batteriekapazität im 2DS Szenario, im B2DS Szenario liegt die erforderliche Kapazität bei 1.500 GWh. Im Jahr 2050 steigt der Bedarf noch weiter auf etwa 3.500 GWh im 2DS und 6.600 GWh im B2DS Szenario. Stellt man den prognostizierten Bedarf den gegenwärtig geplanten Projekten gegenüber, ergibt sich eine deutliche Diskrepanz. Global ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine Kapazität von 313 GWh / Jahr Batteriezellenproduktion (Lithium-Ionen-Zellen) projektiert.

Weiterhin geht mit dem Markthochlauf der Elektromobilität ein rasanter Nachfrageanstieg nach Schlüsselrohstoffen für die Lithium-Ionen-Zellen einher. Insbesondere für Lithium und Kobalt ist ein sehr starker Nachfragezuwachs zu erwarten, aber auch Nickel, Kupfer, Graphit und Silizium werden im Zuge der Elektrifizierung deutlich mehr nachgefragt. Der schnelle Zuwachs kann unter Umständen zu temporären Verknappungen führen. Aufgrund ausreichend hoher Reserven und Ressourcen ist eine physische Verknappung auszuschließen. Zudem kann durch ein konsequentes Sammeln und Recyceln der Batterien 10 % der Nachfrage nach Lithium, Kobalt und Nickel im Jahr 2030 und 40 % im Jahr 2050 befriedigt werden. Gerade für Europa ist das Recycling der Lithium-Ionen-Batterien eine strategische Notwendigkeit zur Minderung von Rohstoffabhängigkeiten.

Im weiteren Verlauf des Fab4Lib Projekts werden Aspekte der Primärförderung der Schlüsselrohstoffe unter den Gesichtspunkten ökologischer und sozialer Auswirkungen näher beleuchtet und der aktuellste Stand ermittelt. Zudem werden spezifische Umweltaspekte der geplanten Zellfertigung von Terra-E explizit mit den Projektpartnern untersucht.

Summary

Within the framework of the project Fab4Lib funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), the Oeko-Institut has calculated the global raw material demand for key materials for lithium-ion cells up to 2050 on the basis of the latest mobility scenarios of the IEA and with the support of its network partners with regard to the development of battery types and capacities.

Based on annual sales figures of different vehicles with different drive types, the requirements for key raw materials of the batteries are calculated. On the one hand, a 2DS scenario is considered, which aims at a maximum temperature increase of 2 °C until 2100 and an even more optimistic B2DS scenario, which is based on the objectives of the Paris Climate Agreement.

Both scenarios show a rapid growth of electric vehicles. In the 2DS scenario, in 2030 more than a third of passenger cars are at least partially electric; by 2050 the share will rise to about 80 %. In the B2DS scenario, half of all passenger cars are already equipped with alternative drive systems in 2030 and by 2050 no more cars with combustion engines will be sold. Overall, there will be a significant increase in the number of battery-powered vehicles across all vehicle types.

Based on the most recent publications and discussions with experts from industry and academia, battery capacities were defined depending on the vehicle type, type of drivetrain and year. In total, in 2030 there will be a global demand of 1,000 GWh battery capacity in the 2DS scenario, in the B2DS scenario the required capacity is 1,500 GWh. In the year 2050 the demand rises even further to about 3,500 GWh in the 2DS scenario and 6,600 GWh in the B2DS scenario. If one compares the forecast demand with the currently planned projects, there is a clear discrepancy. At present, a global capacity of 313 GWh / year battery cell production (lithium ion cells) is projected.

Furthermore, the market ramp-up of electromobility is accompanied by a rapid increase in demand for key raw materials for lithium-ion cells. Especially for lithium and cobalt a very strong increase in demand is to be expected, but also nickel, copper, graphite and silicon will be much more in demand in the course of electrification. The rapid growth can lead to temporary shortages under certain circumstances, a physical shortage however, can be ruled out due to sufficiently high reserves and resources. In addition, the consistent collection and recycling of batteries can satisfy 10 % of the demand for lithium, cobalt and nickel in 2030 and 40 % in 2050. For Europe in particular, recycling lithium-ion batteries is a strategic necessity to reduce dependence on raw materials.

In the further course of the Fab4Lib project, aspects of the primary production of key raw materials will be examined in more detail particularly from an ecological and social perspective. In addition, specific environmental aspects of the planned cell production of Terra-E will be explicitly investigated together with the project partners.

1. Einleitung & Hintergrund

Im Zusammenhang mit dem weltweiten Wachstum der Elektromobilität haben Diskussionen über die Nachfragentwicklung von Schlüsselrohstoffen für Lithium-Ionen-Batterien wie Kobalt oder Lithium und der entsprechenden Bedarfsbefriedigung erheblich zugenommen. Fragen zu einer umweltgerechten und sozialgerechten Rohstoffförderung sind ebenso Gegenstand von zahlreichen Tagungen, in Fachbeiträgen usw. wie auch die Rolle und das Potenzial des Recyclings der Antriebsbatterien. Das Öko-Institut hatte hierzu im Herbst 2017 in einer umfassenden Arbeit für die Agora Verkehrswende Antworten geliefert und Empfehlungen für eine optimierte und gleichzeitig umweltgerechte und sozialgerechte Rohstoffversorgung formuliert (Buchert et al. 2017).

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes Fab4Lib mit 17 Partnern unter Leitung der TerraE¹ hat das Öko-Institut unter maßgeblicher Unterstützung der industriellen und wissenschaftlichen Verbundpartner und auf Basis neuester globaler Mobilitätsszenarien sowie der aktuellen Entwicklungen im Bereich der Lithium-Ionen-Zellen, Rohstoffszenarien für die Elektromobilität erneut berechnet. Diese Ergebnisse werden hier vorgestellt inkl. der Situation und der Potenziale des Recyclings der Batterien zur Bedarfsbefriedigung der Nachfrage der Schlüsselrohstoffe. Die Aktualisierung der Rohstoffszenarien ist relevant und notwendig, da die Elektromobilität und die damit verbundenen industriellen Wertschöpfungsketten eine ungemein hohe Entwicklungsdynamik aufweisen.

Nach weiteren Arbeiten im Fab4Lib-Verbundvorhaben werden im Laufe des Jahres 2019 zusätzliche neue Ergebnisse u. a. zu ökologischen Aspekten der geplanten Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen durch TerraE in Deutschland veröffentlicht werden.

2. Szenarien

Es bedarf es einer guten und belastbaren Datenbasis, um die Hochrechnung der Rohstoffbedarfe der Batteriezellenproduktion für die Elektromobilität möglichst genau abzuschätzen. Hierzu wird auf globale Mobilitätsszenarien aufgebaut, die von der International Energy Agency (IEA) veröffentlicht wurden. In dieser Arbeit werden nur Rohstoffbedarfe im Bereich der Straßenverkehrsmittel erfasst. Andere Transportanwendungen oder Applikationen von Lithium-Ionen-Batterien im portablen Bereich werden nicht betrachtet.

2.1. Übersicht über aktuelle Mobilitätsszenarien

Eine Vielzahl unterschiedlicher Szenarien zum Markthochlauf von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen werden fortlaufend publiziert (z. B. IEA 2016, IEA 2017, IEA 2018, Bloomberg New Energy Finance 2018, BP 2018, Exxon 2018, OPEC 2017, Ernst & Young 2017, IEEJ 2018). Diese unterscheiden sich zum Teil erheblich in den betrachteten Zeithorizonten, den zugrundeliegenden Annahmen und Zielen sowie der Detailtiefe. Zudem werden häufig gezielt nur begrenzte geographische Räume (z. B. EU) betrachtet oder nur bestimmte Fahrzeugsegmente berücksichtigt.

Für die Hochrechnung des jährlichen Gesamtbedarfs an Schlüsselrohstoffen für die Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen spielen die oben genannten Faktoren eine wesentliche Rolle. Um eine möglichst belastbare Abschätzung treffen zu können, werden deshalb vor allem detailliert aufgeschlüsselte, globale Szenarien benötigt. Aus diesen müssen Daten zu Fahrzeugtypen (z. B. Busse, Pkw oder Motorräder) sowie Antrieb (bspw. Vollelektrisch, Hybrid oder Brennstoffzelle) hervorgehen, da dafür unterschiedlich dimensionierte Batterien verbaut werden.

¹ <https://www.terrae.com/2018/11/28/536/>

Aus den oben genannten Gründen werden daher Zahlen der International Energy Agency verwendet. Diese sind überwiegend frei zugänglich und beinhalten die höchste Detailtiefe aller aktuell verfügbaren globalen Mobilitätsszenarien.

2.2. Methodik

Die von der IEA verwendeten Daten beziehen sich auf den Fahrzeugbestand im jeweiligen Jahr. Für die Betrachtung des gesamten jährlichen CO₂-Ausstoßes einer Fahrzeugflotte ist diese Betrachtungsweise sinnvoll. Für die Berechnung des jährlichen Rohstoffbedarfs hingegen werden jährliche Zulassungs- oder Verkaufszahlen benötigt.

In dieser Arbeit werden drei Stützjahre (2016, 2030, 2050) für die Verkaufszahlen der Fahrzeuge betrachtet. Im Basisjahr wurden die Verkaufszahlen weitestgehend durch verfügbare Statistiken ermittelt und durch publizierte Expertenschätzungen ergänzt. Die Verkaufszahlen für die Stützjahre 2030 und 2050 wurden aus den Bestandszahlen der IEA ermittelt. Hierbei wurden für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen bestimmte mittlere Lebensdauern angenommen und mithilfe einer Gauß-Verteilung die jährlichen Verkaufszahlen aus dem Bestand ermittelt.

Es werden zwei Szenarien der IEA miteinander verglichen. Beide Szenarien zeichnen eine optimistische Entwicklung alternativer Antriebe. Es werden das zwei Grad Szenario (2DS) und ein noch optimistischeres Szenario (B2DS - „beyond two degrees“) betrachtet.

Das 2DS-Szenario zielt darauf ab, die erwartete globale Durchschnittstemperatur auf maximal 2° C bis zum Jahr 2100 zu begrenzen. Im Straßenverkehr werden dafür klare politische Entscheidungen vorausgesetzt, die weniger energieintensive Fahrzeuge begünstigen.

Das B2DS-Szenario bildet die Ambitionen des Pariser Abkommens ab und zielt auf einen maximalen Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf 1,75° C bis zum Jahr 2100. Im Verkehrssektor erfordert dies eine noch stärkere politische Förderung emissionsarmer Transportarten. Zusätzlich bedarf es eines sehr schnellen Markthochlaufs von CO₂-freien Antrieben und die Nutzung CO₂-armer Energieträger.

2.3. Ergebnisse

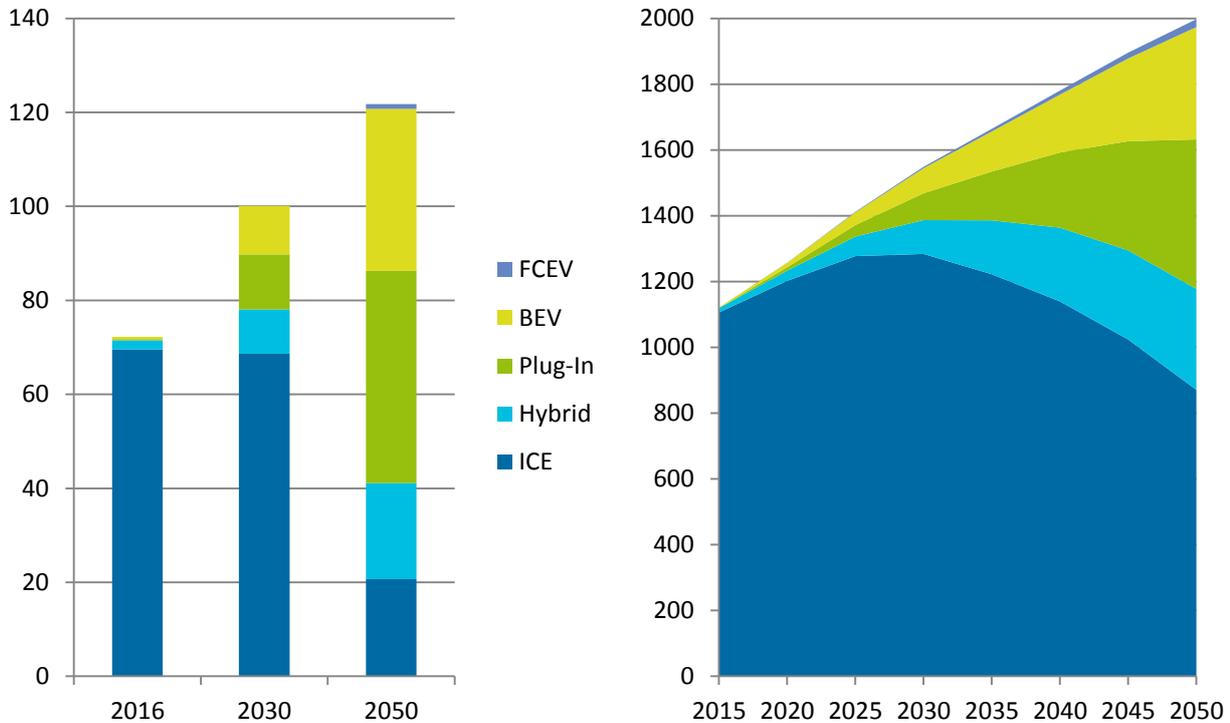
Auf der nachfolgenden Abbildung sind die Verkaufs- und Bestandszahlen der globalen Pkw-Flotte im 2DS Szenario zu sehen. Unterschieden wird nach Pkw mit Verbrennungsmotoren (ICE), Hybrid-Pkw (HEV), Plug-in-Hybride (PHEV), vollelektrische Pkw (BEV) sowie Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV). Im Basisjahr 2016 sind global knapp 1,1 Milliarden Pkw zugelassen, von denen fast alle mit konventionellen Verbrennungsmotoren angetrieben werden. Auf der Verkaufsseite ist der Anteil alternativer Antriebe im Jahr 2016 etwas größer, er bewegt sich bei knapp 4 %².

Im Jahr 2030 stagniert der Verkauf von konventionellen Antrieben im Vergleich zu 2016 leicht, während es einen deutlichen Zuwachs an alternativen Antrieben gibt. Insbesondere vollelektrische und Plug-in Antriebe werden nachgefragt. Von den knapp über 100 Millionen Pkw-Verkäufen sind knapp ein Drittel alternative Antriebe. Der globale Pkw-Bestand steigt auf über 1,5 Milliarden Fahrzeuge, davon ca. 20 % vollelektrische oder Hybrid-Pkw.

² PKW Verkaufszahlen in 2016 basierend auf: OICA 2018, IEA 2017, IEA 2018

Im Jahr 2050 steigt die Bedeutung elektrischer Antriebe gegenüber 2030 nochmal erheblich an. Insgesamt werden im Jahr 2050 120 Millionen Pkw verkauft, nur noch ein Sechstel entfällt auf Verbrenner. Die globale Flotte wächst auf knapp 2 Milliarden Pkw an, von denen knapp die Hälfte über alternative Antriebe verfügt.

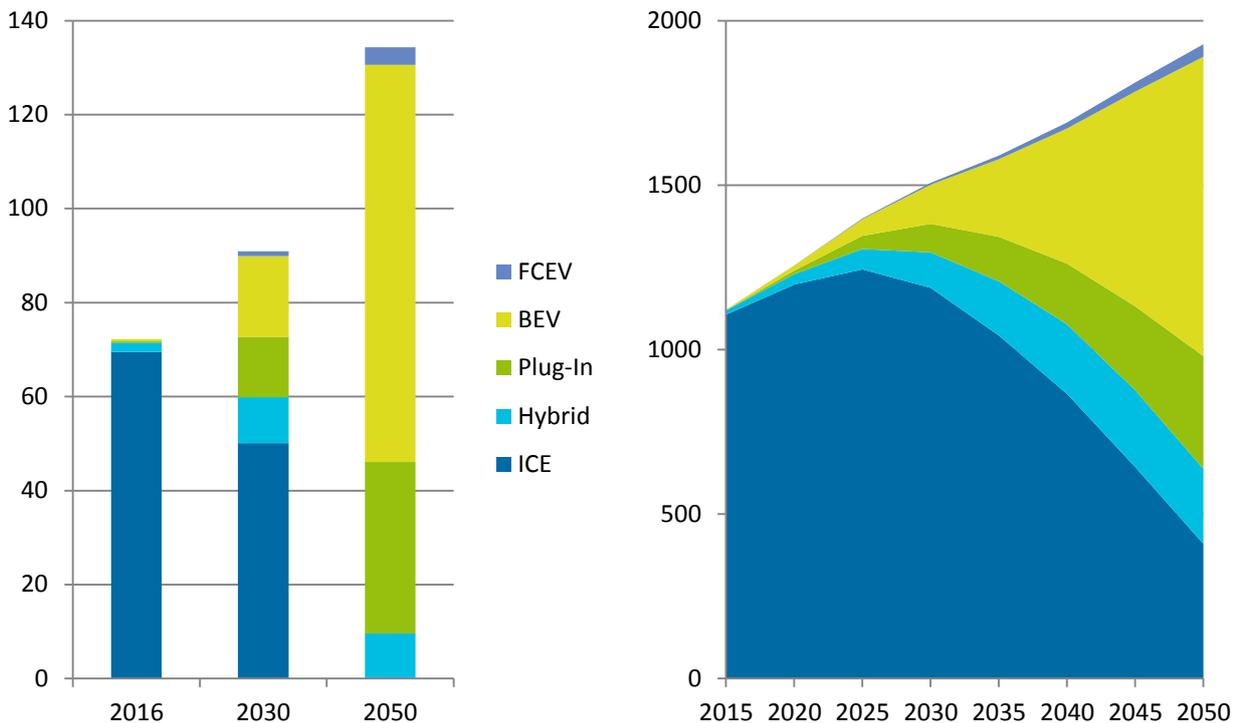
Abbildung 1: PKW 2DS (IEA 2017) – Verkauf (links) und Bestand (rechts) in Millionen pro Jahr



Im B2DS Szenario sieht die Entwicklung noch optimistischer hinsichtlich der Entwicklung elektrischer Antriebe aus (vgl. nachfolgende Abbildung). Ausgehend vom Basisjahr 2016 sind knapp die Hälfte der ca. 90 Millionen verkauften Pkw im Jahr 2030 Hybridfahrzeuge, vollelektrische Pkw oder Brennstoffzellen-Pkw. Damit erfolgt die Elektrifizierung des Pkw-Segments im B2DS Szenario bereits signifikant früher als im 2DS Szenario und setzt sich auch schneller fort.

Im Jahr 2050 sind im Szenario B2DS bereits alle verkauften Pkw mit alternativen Antrieben versehen, wobei batterieelektrische Fahrzeuge mit ca. 85 Millionen Einheiten etwa zwei Drittel der Verkäufe darstellen. Fahrzeuge mit Brennstoffzellen machen fast 4 Millionen der verkauften Einheiten im Jahr 2050 aus. Die Gesamtverkäufe steigen auf über 130 Millionen Einheiten und liegen damit auch über dem 2DS Szenario. Dies liegt vor allem daran, dass konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor wesentlich zügiger durch Pkw mit alternativen Antrieben ersetzt werden. Die schnelle Elektrifizierung spiegelt sich auch im Fahrzeugbestand wieder, im Jahr 2050 machen konventionelle Antriebe mit Verbrennungsmotor nur noch etwa ein Fünftel des Bestandes aus.

Abbildung 2: PKW B2DS (IEA 2017) – Verkauf (links) und Bestand (rechts) in Millionen pro Jahr



In dieser Arbeit werden neben den Pkw auch Pedelecs, Krafräder, Busse, Minibusse sowie schwere Lkw und leichte Lkw³. betrachtet In der nachfolgenden Abbildung sind die Verkaufszahlen der einzelnen Fahrzeugtypen im B2DS- Szenario dargestellt. Hierbei werden analog zur vorangegangenen Abbildung die Antriebstypen unterschieden.

Im Basisjahr 2016 sind bei fast allen Fahrzeugtypen Verbrennungsmotoren verbaut. Ausnahme bilden Pedelecs, wobei deren konventionelles Pendant - das Fahrrad - nicht betrachtet wird. Einzig im Pkw- (siehe voriger Abschnitt), Bus- (VR China) und Krafrad-Segment spielen alternative Antriebe bereits 2016 eine Rolle⁴. Wobei die elektrischen Krafräder im Basisjahr vor allem in Südostasien und China anzutreffen sind. Diese Fahrzeuge werden hauptsächlich von Blei-Säure Batterien angetrieben. Was die Verkaufszahlen anbelangt dominieren vor allem Pkw, gefolgt von Krafrädern und Pedelecs. Busse und Lkw weisen deutlich weniger verkaufte Einheiten auf.

Im Jahr 2030 gibt es einen deutlichen Sprung bei den elektrischen Krafrädern. Dies ist vor allem auf die kürzere Lebensdauer gegenüber bspw. Pkw zurückzuführen sowie der zunehmenden Nutzung im urbanen Raum in Südostasien und China. In allen anderen Fahrzeugsegmenten werden alternative Antriebe zunehmend nachgefragt. Insbesondere elektrische Busse, die häufig in Innenstädten eingesetzt werden, sind gefragt. Dieser Trend zeichnet sich bereits gegenwärtig ab, v. a. in China.

³ Leichte Lkw (MFT – medium freight trucks) reichen von 3,5 Tonnen bis 15,5 Tonnen Gesamtfahrzeuggewicht. Schwere Lkw (HFT – heavy freight trucks) umfassen Lkw über 15,5 Tonnen Gesamtfahrzeuggewicht.

⁴ Startdaten basierend auf:

Pedelecs: Navigant 2016; **Krafräder:** IEA 2016, IEA 2018 **Bus:** OICA 2018, Clean Technica 2016, **Minibus:** IEA 2017; **HFT:** OICA 2018, IEA 2017; **MFT:** IEA 2017

Im Jahr 2050 werden nur noch alternativ angetriebene Pkw, Krafträder, Busse und Minibusse verkauft. Im Gütertransport mit Lkw wird noch immer circa die Hälfte der verkauften Fahrzeuge von Verbrennungsmotoren angetrieben, allerdings sind v. a. (Oberleitungs)-Lkws und Hybride weit verbreitet. Die Gesamtverkaufszahlen nehmen in allen Segmenten, bis auf die Krafträder, deutlich zu.

Abbildung 3: Entwicklung der Verkaufszahlen im B2DS Szenario nach Typ und Antrieb (in Millionen verkaufter Einheiten)

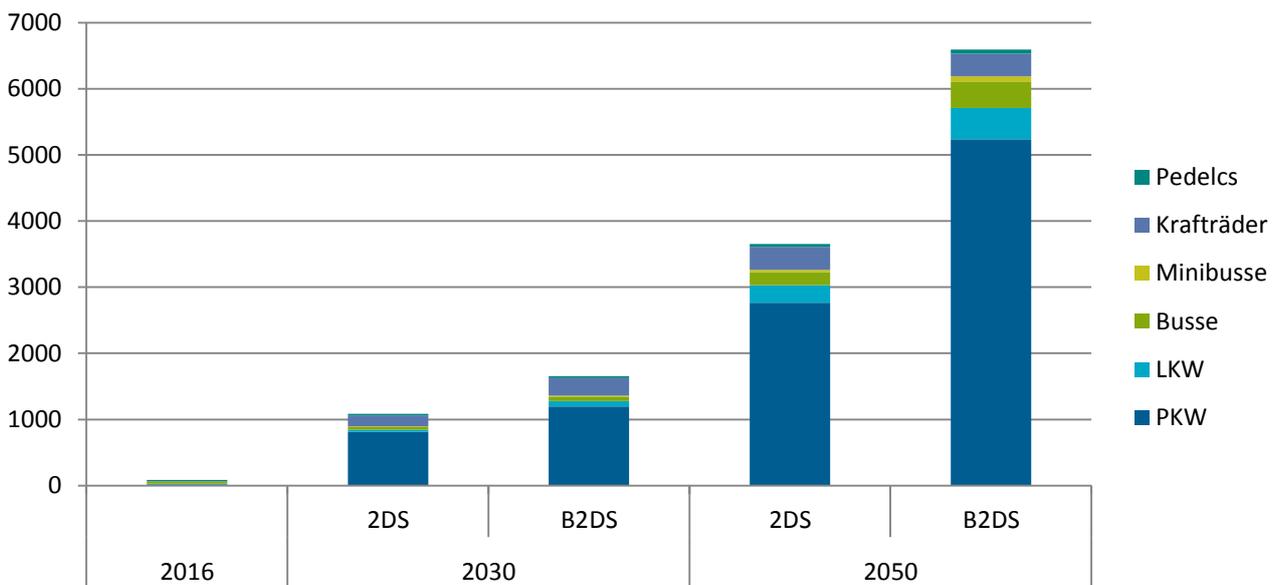


3. Benötigte Batteriekapazitäten in Gigawatt-Stunden

Aus der Analyse der globalen Mobilitätsszenarien geht deutlich hervor, dass die Nachfrage nach elektrischen Antrieben und damit nach Lithium-Ionen-Batterien signifikant steigen wird. In der nachfolgenden Grafik wird dargestellt, wie viel Gesamtkapazität an Batterien (in Gigawattstunden) produziert werden müssten, um den projizierten Bedarf für den Straßenverkehrssektor zu befriedigen. Zudem wird unterschieden, welchen Anteil jedes Fahrzeugsegment zum Bedarf beiträgt. Im Ausgangsjahr 2016 beträgt die nachgefragte globale Batteriekapazität der Elektromobilität ca. 85 GWh. Im Stützjahr 2030 liegen das 2DS und das B2DS Szenario bereits mit etwa 1.000 und ca. 1.500 benötigten GWh in ähnlichen Dimensionen. Im Stützjahr 2050 hingegen sind die benötigten Kapazitäten mit 6.600 GWh im B2DS Szenario jedoch fast doppelt so hoch wie im 2DS Szenario. Die Details zu den angesetzten Batteriekapazitäten je Fahrzeugtyp und Stützjahr finden sich im Anhang dieser Arbeit.

Weiterhin wird deutlich, dass das Pkw-Segment, wie bei den Verkaufszahlen auch, den wesentlichen Anteil an der Nachfrage generiert. Fast 80 % der Batteriekapazität im Jahr 2050 im B2DS Szenario wird vom Pkw Segment nachgefragt. Im Vergleich zu den verkauften Einheiten relativieren sich aber an anderer Stelle die Verhältnisse. So werden trotz hoher verkaufter Stückzahlen bei den Krafträdern nur geringe Batteriekapazitäten nötig. Im Gegensatz hierzu generieren die wenigen verkauften Einheiten von Bussen, aufgrund größerer Batterien, einen ähnlich hohen Bedarf.

Abbildung 4: Projizierter jährlicher GWh-Bedarf der globalen Elektromobilität



Die prognostizierten 6600 GWh Bedarf an Batteriekapazitäten im B2DS-Szenario im Jahr 2050 decken sich sehr gut mit Berechnungen anderer Autoren. Driscoll Consulting LLC (2018) geben – nach eigener Berechnung und unabhängig von dieser Arbeit – einen sehr ähnlichen Wert für die Elektrifizierung der gesamten globalen Fahrzeugflotte an.

Stellt man den prognostizierten Bedarf den gegenwärtig geplanten Projekten gegenüber, ergibt sich eine deutliche Diskrepanz. Global ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine Kapazität von 313 GWh / Jahr Batteriezellenproduktion (Lithium-Ionen-Zellen) projektiert. Damit ergibt sich eine 21 Mal höhere Nachfrage bis 2050 (Driscoll Consulting LLC 2018). Wird ein jährlicher Produktionsausstoß von 30 GWh je Gigafactory unterstellt, werden für die globale Elektromobilität im Jahr 2050 nach dem B2DS-Szenario 220 Gigafactories zur Produktion der benötigten Lithium-Ionen-

Zellen benötigt. Da Europa einen wesentlichen Teilmarkt darstellen wird, ergibt sich langfristig für Europa ein Bedarf von mehreren Dutzend Gigafactories.

4. Rohstoffbedarfe der Lithium-Ionen-Zellen

Die präsentierten Szenarien zeigen mittel- und langfristig einen deutlichen Anstieg elektrisch angetriebener Fahrzeuge. Ein Kernaspekt dieses Hochlaufs sind die benötigten Batterien. Nach heutigem Kenntnisstand wird die Speichertechnologie im Bereich der Elektrofahrzeuge eindeutig von unterschiedlichen Varianten der Lithium-Ionen-Zellen dominiert. Dies kann zumindest bis 2030 als sehr wahrscheinlich gelten. Daher sind die mittelfristigen Entwicklungen bis 2030 wesentlich sicherer als die langfristige Betrachtung bis 2050. Technologische Innovationen, die sich disruptiv auf den Markt auswirken könnten, wie bspw. Feststoff-Batterien wurden in den Betrachtungen nicht berücksichtigt. Nach heutigem Kenntnisstand ist eine Prognose, ob und wann neue Speichertechnologien großtechnisch in den Markt eintreten könnten, extrem schwierig und unsicher.

Die Produktion der Lithium-Ionen-Zellen geht mit einem Nachfragezuwachs der benötigten Rohstoffe einher. Neben einer Mengenabschätzung wie hoch der Bedarf für die jeweiligen Rohstoffe ausfallen könnte, wird in diesem Kapitel thematisiert, welche Versorgungsfragen mit dem Abbau der jeweiligen Rohstoffe verbunden sind. Zudem werden Recyclingpotenziale aufgezeigt. In Absprache mit Experten aus dem Fab4Lib-Verbund wurden neueste Daten für die Zusammensetzungen der Batteriezellen der einzelnen Antriebe und Fahrzeugkategorien zusammengetragen sowie Einschätzungen über die Entwicklung der künftigen Zellchemien getroffen. Aus den projektierten Stückzahlen und Annahmen zu den Batteriezellen wurden die Rohstoffbedarfe ermittelt.

Im Rahmen der Recherche für diese Kurzstudie wurden in Abstimmung mit den Fab4Lib-Verbundpartnern die Schlüsselrohstoffe Lithium, Kobalt, Nickel, Kupfer, Graphit und Silizium betrachtet. In den folgenden Ausführungen stehen Lithium, Kobalt und Nickel im Fokus, da hier die größten Dynamiken erkennbar sind (Informationen und Bedarfsprojektionen für die anderen Rohstoffe befinden sich im Anhang). An dieser Stelle werden aus Gründen der Übersichtlichkeit lediglich die projektierten Rohstoffbedarfe für das optimistischere B2DS-Szenario dargestellt.

4.1. Lithium

Lithium⁵ wird in einer Reihe von Anwendungen eingesetzt, global gesehen haben aktuell Keramik und Glas mit 27 % einen wesentlichen Anteil, aber auch die Nutzung in Schmierfetten und in der Polymerherstellung sind wichtige Anwendungen. Seit zwei Jahren sind allerdings Batterien die mit Abstand wichtigste Anwendung mit dem höchsten Wachstum. Fast 50 % des Lithiums geht derzeit in die Produktion von Batterien (USGS 2018).

Primär gewonnenes Lithium wird auf zwei unterschiedlichen Wegen abgebaut. Zum einen wird der Rohstoff v. a. in Australien im Festgesteinsbergbau gefördert. Zum anderen wird der Rohstoff aus Salzseen v. a. in Südamerika, in Chile und Argentinien gewonnen.

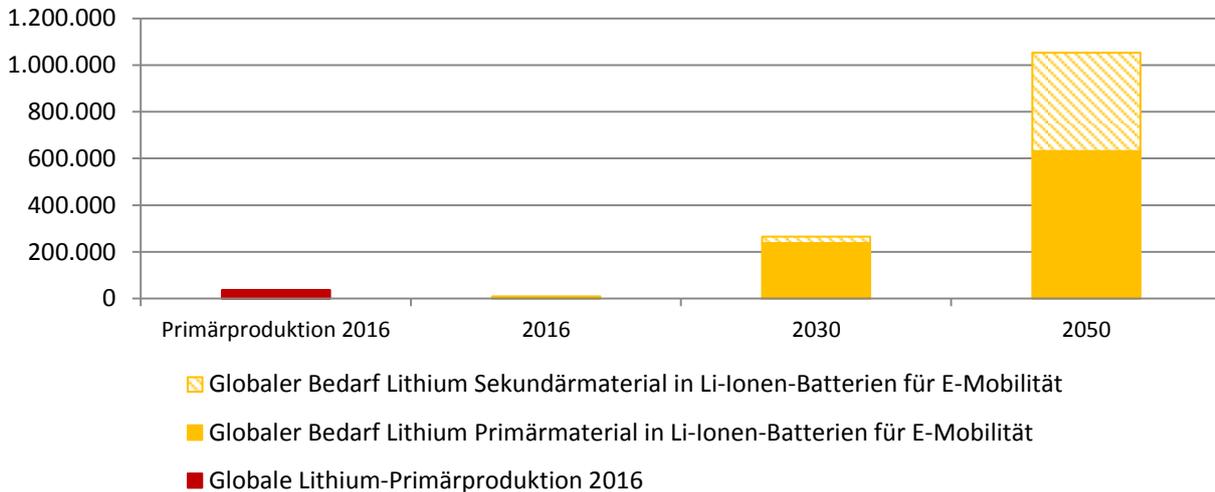
Im Ausgangsjahr 2016 werden ca. 10.000 Tonnen Lithium für die Verwendung in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen verwendet. Das entspricht etwa dem Viertel der gegenwärtigen globalen Primärförderung von 38.000 Tonnen⁶. Nach dem B2DS Szenario könnten im Jahr 2030 fast

⁵ In diesem Papier ist der Begriff „Lithium“ als synonym zu „Lithiumgehalt“ zu verstehen. Sowohl in den Rohstoffen als auch in den Zwischenprodukten (z. B. Lithiumcarbonat) und Endprodukten handelt es sich um Lithiumsalze bzw. Lithiumverbindungen.

⁶ Die zuvor erwähnten Anwendungen berücksichtigen neben Batterien für die e-Mobilität auch portable Batterien.

240.000 Tonnen Lithium für die globale Elektromobilität benötigt werden. 10 % des Bedarfs könnten bereits durch Sekundärmaterial abgedeckt werden, welches aus End-of-Life Batterien zurückgewonnen wird. Im Jahr 2050 könnte der Bedarf nach diesem Szenario bis auf 1,1 Millionen Tonnen steigen, bei konsequenter Sammlung und Recycling von Altbatterien können dann bis zu 40 % des Bedarfs durch Recyclingmaterial abgedeckt werden.

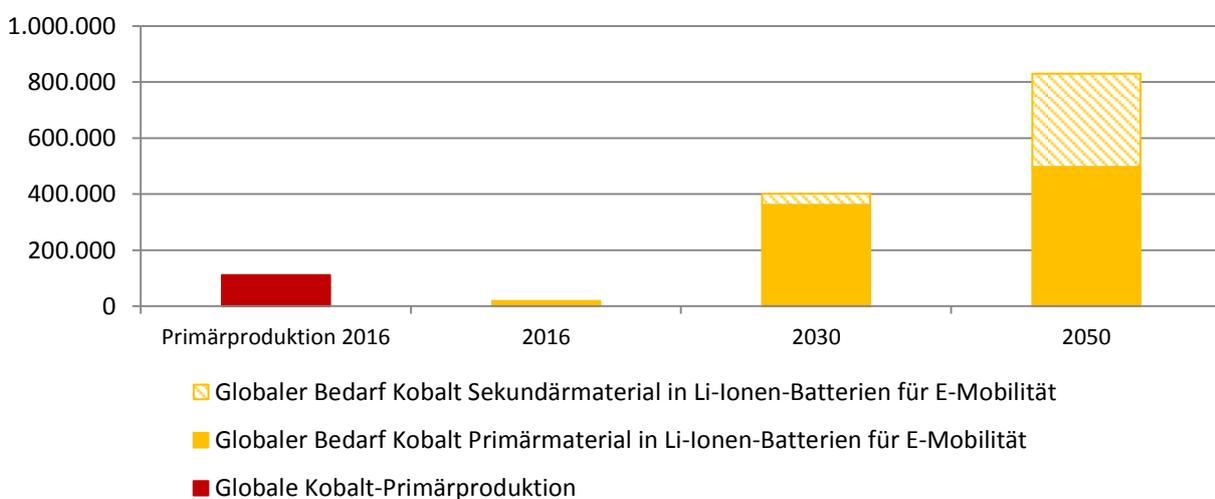
Abbildung 5: Rohstoffbedarf in Tonnen Lithium im B2DS Szenario



4.2. Kobalt

Die Primärproduktion von Kobalt betrug im Jahr 2016 rund 111.000 Tonnen (USGS 2018). In den weitaus meisten natürlichen Vorkommen ist Kobalt mit kupfer-, nickel- oder kupfernickelhaltigen Erzen vergesellschaftet. Rund 58 % der globalen Minenproduktion entfiel 2016 auf die Demokratische Republik Kongo. Die restliche Minenproduktion verteilte sich auf mehr als ein Dutzend weiterer Staaten (USGS 2018). Auf wieder aufladbare Batterien (überwiegend Lithium-Ionen-Batterien) entfallen aktuell rund 50 % des weltweiten Kobaltbedarfs (Cobalt Institute 2019). Weitere wichtige Anwendungen sind Superlegierungen und Industriekatalysatoren.

Abbildung 6: Rohstoffbedarf in Tonnen Kobalt im B2DS Szenario



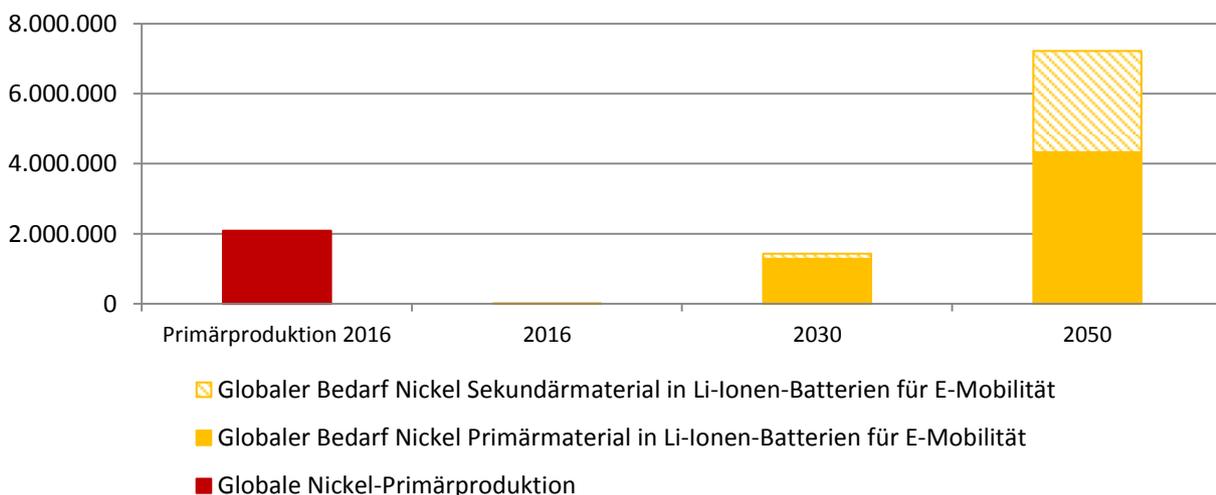
Aus der obigen Abbildung ist zu entnehmen, dass im Ausgangsjahr 2016 der Kobaltbedarf für die globale Elektromobilität knapp 20.000 Tonnen betrug. Nach dem B2DS-Szenario ist für 2030 von einem Kobaltbedarf für die Elektromobilität von rund 400.000 Tonnen und für 2050 von gut 800.000 Tonnen jährlich auszugehen. Bei der Interpretation dieser Zahlen ist zu berücksichtigen, dass für die Zusammensetzung der dominierenden NMC-Lithium-Ionen-Zellen die bereits heute einsetzende Entwicklung der Minderung des Kobaltanteil bei gleichzeitiger Erhöhung des Nickelanteils – d. h. die Entwicklung von NMC 1:1:1 über NMC 6:2:2 zu NMC 8:1:1 und langfristig zu NMC 90:5:5 in den Szenarien berücksichtigt sind. Ohne die Tendenz zu Lithium-Ionen-Zellen mit vermindertem Kobaltanteil würde die Kobaltnachfrage für die globale Elektromobilität mittel- und langfristig noch erheblich höher ausfallen.

Aus den Szenarienergebnissen geht weiterhin hervor, dass durch ein Recycling der Lithium-Ionen-Batterien aus der Elektromobilität mit sehr hohen Sammel- und Rückgewinnungsquoten (für die Schlüsselmetalle) 2030 ein Anteil von 10 % und 2050 gar ein Anteil von rund 40 % des Kobaltbedarfs gedeckt werden kann. Aus diesen Zahlen wird die hohe strategische Bedeutung eines hochwertigen Recyclingsystems für Lithium-Ionen-Batterien deutlich.

4.3. Nickel

Im Gegensatz zu Lithium und Kobalt ist aktuell der Anteil der Elektromobilität an der globalen Nickelnachfrage noch verhältnismäßig gering. Im Ausgangsjahr 2016 stand der globalen Primärproduktion von 2,09 Mio. Tonnen Nickel (USGS 2018) ein Bedarf der globalen Elektromobilität von rund 21.000 Tonnen Nickel gegenüber. Von der globalen Nickelproduktion finden derzeit rund 2/3 in der Herstellung von Edelstählen Verwendung (USGS 2018). Im Gegensatz zu Kobalt ist die Minenproduktion von Nickel auf viele Staaten verteilt. Die Philippinen waren 2016 mit 347.000 Tonnen Nickel das Land mit der größten Minenproduktion (USGS 2018).

Abbildung 7: Rohstoffbedarf in Tonnen Nickel im B2DS Szenario



Aus den Ergebnissen für das B2DS-Szenario ist zu entnehmen, dass der jährliche Bedarf der globalen Elektromobilität bis 2030 auf 1,42 Mio. Tonnen und bis 2050 auf 7,22 Mio. Tonnen Nickel ansteigen wird. Der Trend zu kobaltärmeren NMC-Batteriezellen macht sich bei Nickel umgekehrt in einem entsprechenden steileren Anstieg bis 2050 bemerkbar.

4.4. Einordnung des Rohstoffbedarfs der Elektromobilität

Im Rahmen des BMBF-Projektes Fab4Lib hat das Öko-Institut auf Basis der neuesten Mobilitäts-szenarien der IEA und mit Unterstützung der Verbundpartner hinsichtlich der Entwicklung der Batterie-typen und Batteriekapazitäten die Rohstoffbedarfe der Schlüsselmaterialien Lithium, Kobalt, Nickel, Graphit, Silizium und Kupfer für Lithium-Ionen-Zellen bis 2050 berechnet. Für die Schlüs-selmaterialien Lithium, Kobalt und Nickel ergeben sich nach dem wesentlichen Szenario B2DS, welches für den Sektor Mobilität das Pariser Klimaschutzziel adressiert, erhebliche Nachfragestei-gerungen bis zum Jahr 2030. Bis zum Jahr 2050 - falls die Lithium-Ionen-Zellen auch langfristig die Speichertechnologie der Wahl für Elektrofahrzeuge bleiben - erhöht sich die Nachfragestrategie in noch größerem Ausmaße. Bei ambitioniertem Ausbau der Recyclinginfrastruktur für Lithium-Ionen-Batterien können im Jahr 2030 rund 10 % und im Jahr 2050 sogar 40 % des weltweiten Bedarfs dieser Rohstoffe für die Elektromobilität durch Batterierecycling gewonnen werden.

Diese Ergebnisse bestätigen in der Größenordnung Szenarien des Öko-Instituts, die im Jahr 2017 von der Agora Verkehrswende veröffentlicht worden sind (Buchert et al. 2017). Für die hier veröf-fentlichte Arbeit flossen zahlreiche Erste-Hand-Informationen der Verbundpartner aus Wissen-schaft und Industrieunternehmen im Bereich der Zellkomponenten ein. So wurden die aktuellen Erkenntnisse hinsichtlich der Reduzierung des Kobaltgehaltes der NMC-Kathoden ebenso berück-sichtigt wie die Entwicklung und allmähliche Marktdurchdringung von Graphit-Anoden mit wach-senden Siliziumanteilen zur Erhöhung der Energiedichte. Die Ergebnisse für die Zellmaterialien Kupfer, Graphit und Silizium finden sich im Anhang dieser Arbeit. Erwartungsgemäß ist auch für diese Rohstoffe mit erheblichen Wachstumseffekten durch die Elektromobilität zu rechnen. Aller-dings stellen die Werte im Vergleich mit der aktuellen globalen Primärproduktion für diese Rohstof-fe eine weniger gravierende Entwicklung im Vergleich zu Lithium, Kobalt und Nickel dar. Im Falle von Graphit ist zudem der Sonderfall zu beachten, dass neben Naturgraphit auch synthetisch her-gestellter Graphit (aus z. B. Petrolkoks und Steinkohlenteer) eine wichtige Rohstoffquelle darstellt.

Angesichts der aktuell bekannten globalen Reserven für Lithium (16 Mio. Tonnen), Kobalt (7,1 Mio. Tonnen) und Nickel (74 Mio. Tonnen) und noch weitaus größerer natürlicher Ressourcen (vgl. USGS 2018) wiederholt das Öko-Institut sein zurückliegendes Statement (Buchert et al. 2017), dass eine absolute physische Verknappung dieser Rohstoffe nicht zu erwarten ist. Allerdings sind bei der ausgesprochen dynamischen Entwicklung der Elektromobilität und vor allem bei Durch-dringung des globalen Massenmarktes für Straßenfahrzeuge temporäre – also zeitlich begrenzte – Verknappungen auf allen Stufen der Wertschöpfungsketten möglich, d. h. auch auf der Seite der Rohstoffversorgung.

Gerade in Europa kann möglichen temporären Verknappungen von z. B. Lithium, Kobalt und Ni-ckel durch die Bereitstellung von Schlüsselrohstoffen aus dem Batterierecycling robust entgegen-gewirkt werden. Damit kann auch die derzeit sehr starke Abhängigkeit der europäischen Industrie von Rohstoffbezügen aus dem außereuropäischen Ausland für diese Schlüsselmaterialien stark reduziert werden. Gerade für den vorgesehenen Aufbau einer eigenen deutschen bzw. europäi-schen Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen in größeren Dimensionen (Gigafactories) ist ein euro-päisches Standbein für die Rohstoffversorgung strategisch wichtig. Da Europa einer der Hauptab-satzmärkte für Elektrofahrzeuge werden wird, werden folglich zunehmend große potentielle Se-kundärrohstoffquellen für Lithium, Kobalt, Nickel etc. auf Europas Straßen fahren.

Für das strategische Thema Recycling ist im Fab4Lib-Verbund Umicore als weltweit führendes Unternehmen für die Herstellung von NMC-Kathodenmaterial und für das Recycling u. a. von Lithi-um-Ionen-Batterien federführend verantwortlich. Projektergebnisse zum Komplex Recycling wer-den im weiteren Verlauf des Projektes noch abgeschlossen und veröffentlicht werden. An dieser

Stelle ist zudem auf die dringend notwendige Revision der Europäischen Batterierichtlinie hinzuweisen, welche nicht zuletzt auf die Anforderungen hin, die sich aus der dynamischen Entwicklung der Elektromobilität ergeben, angepasst und optimiert werden muss (Stahl et al. 2018, Buchert et al. 2017).

5. Fazit und Ausblick

Eine Vielzahl europäischer Fahrzeughersteller kündigt bereits breitere Paletten elektrischer Fahrzeuge an oder gar ein vollständiges Abrücken vom reinen Verbrennungsantrieb (Manager Magazin 2017, Ferrari-Herrmann 2018). Die in diesem Paper beschriebenen Szenarien führen diesen Trend fort und unterstreichen einen rapiden Markthochlauf der E-Mobilität. Dies führt zu einem schnell steigenden Bedarf an Fertigungskapazitäten von Gigafactories für Lithium-Ionen-Zellen sowie einem deutlichen Zuwachs der Nachfrage nach den benötigten Schlüsselrohstoffen. In den Szenarien wurden hierbei neueste Erkenntnisse wie bspw. kobaltarme Kathoden in den Hochrechnungen berücksichtigt

In Europa und Deutschland findet, bis auf wenige Ausnahmen zurzeit noch keine Großserienfertigung von Lithium-Ionen-Zellen statt. Gegenwärtig sind vor allem asiatische Hersteller, allen voran chinesische und südkoreanische Unternehmen dominierend in der Produktion. Es besteht nach Absicht der EU-Kommission und der Bundesregierung dringender Handlungsbedarf, um den Anschluss an die globale Konkurrenz nicht zu verpassen. Dementsprechend liegt der Fokus des Projekts Fab4Lib auf der Vorbereitung einer deutschen Zellfertigung⁷.

Eine Zellfertigung in Deutschland hängt nicht zuletzt mit einer sicheren Rohstoffversorgung zusammen. Dementsprechend muss diese von Beginn an mitgedacht werden. Insbesondere das Heben von Recyclingpotenzialen hat einen hohen Stellenwert. Damit kann die Abhängigkeit von primär geförderten Rohstoffen verringert werden.

Im weiteren Verlauf des BMBF-Projekts Fab4Lib werden die Aspekte der Primärförderung der Schlüsselrohstoffe unter den Gesichtspunkten ökologischer und sozialer Auswirkungen näher beleuchtet und der aktuellste Stand ermittelt. Zudem werden spezifische Umweltaspekte der geplanten Zellfertigung von Terra-E explizit mit den Projektpartnern untersucht.

⁷ <https://www.terrae.com/2018/11/28/536/>

6. Referenzen

- Bloomberg New Energy Finance (2018): Global EV Outlook 2018 .Internet:
<https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/EV%20market%20trends%20and%20outlook%20%28by%20Colin%20McKerracher%29.pdf> (aufgerufen am 13.12.2018)
- BP (2018): BP Energy Outlook 2018 .Internet:
<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf> (aufgerufen am 13.12.2018)
- Buchert et al (2017): Buchert, M.; Degreif, S.; Dolega, P., Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen, Öko-Institut e.V., Agora Verkehrswende (Hrsg.), Berlin Oktober 2017.
- Clean Technica (2016): Electric Bus Sales Exploding In China (2010–2015).
<https://cleantechnica.com/2016/09/23/plug-electric-bus-sales-china-explode-2010-2015/> (aufgerufen am 08.01.2018).
- Cobalt Institute (2019): Cobalt Uses – Rechargeable Batteries, Internet:
<https://www.cobaltinstitute.org/rechargeable-batteries.html>, (aufgerufen am 04.01.2019).
- Driscoll Consulting LLC (2018): Global Battery Production Capacity Must Grow 21 Times To Electrify The Global Vehicle Fleet. <https://seekingalpha.com/article/4165188-global-battery-production-capacity-must-grow-21-times-electrify-global-vehicle-fleet> (aufgerufen am 14.12.2018)
- Ernst & Young (2017): Electric Vehicles Gobaal Scenario .Internet:
<https://www.investindia.gov.in/sites/default/files/2018-03/Electric%20Car%20-%20Global%20Scenario-%20How%20do%20you%20balance%20the%20pace%20of%20innovation%20with%20regulation%20s.pdf> (aufgerufen am 13.12.2018)
- Europäische Kommission (2017a): Study on the review of the list of Critical Raw Materials - Non-critical Raw Materials Factsheets. Internet: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6f1e28a7-98fb-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en> (aufgerufen am 19.12.2018).
- Europäische Kommission (2017b): Study on the review of the list of Critical Raw Materials - Critical Raw Materials Factsheets. Internet: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en> (aufgerufen am 19.12.2018).
- Exxon (2018): 2018 Outlook for Energy: A View to 2040 .Internet:
<http://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/outlook-for-energy/2018/2018-outlook-for-energy.pdf> (aufgerufen am 13.12.2018)
- Ferrari-Herrmann, E. (2018): VW wird elektrisch und rüstet alle deutschen Werke bis 2022 um. <https://www.androidpit.de/vw-wird-elektrisch-und-ruestet-alle-deutschen-werke-bis-2022-um> (aufgerufen am 17.12.2018).
- IEA (2016): Energy Technology Perspectives 2016 Internet:
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives2016_ExecutiveSummary_EnglishVersion.pdf (aufgerufen am 13.12.2018)
- IEA (2017): Energy Technology Perspectives 2017 .Internet:
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyTechnologyPerspectives2017ExecutiveSummaryEnglishversion.pdf> (aufgerufen am 13.12.2018)

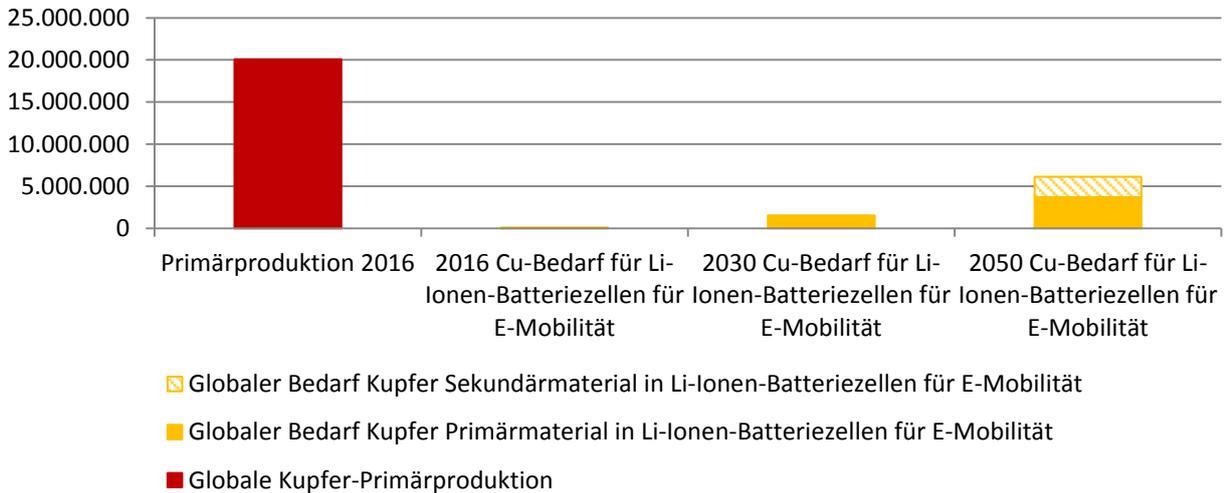
- IEA (2018): Global EV Outlook 2018 .Internet: <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264302365-en.pdf?expires=1530606964&id=id&accname=ocid56027324&checksum=EA73073EF3E8DA7877AD1A9D539D1333> (aufgerufen am 13.12.2018)
- IEEJ (2018): IEEJ Outlook 2018 .Internet: <https://eneken.iej.or.jp/data/7690.pdf> (aufgerufen am 13.12.2018)
- Manager Magazin (2017): Schweden sagen Diesel und Benzin leise Servus Ab 2019 haben alle neuen Volvos einen Elektromotor. <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/volvo-ab-2019-neue-.modelle-nur-noch-mit-e-motor-a-1155999.html> (aufgerufen am 17.12.2018).
- Navigant (2016): Research Report. Executive Summary – Electric Bicycles. <https://www.pedegoelectricbikes.com/wp-content/uploads/2016/07/MF-EBIKE-16-Executive-Summary-w-Pedego.pdf> (aufgerufen am 08.01.2018).
- OICA (2018): 2005-2017 Sales Statistics. <http://www.oica.net/category/sales-statistics> (aufgerufen am 15.12.2018).
- OPEC (2017): World Oil Outlook 2017 .Internet: http://www.opec.org/opec_web/flipbook/WOO2017/WOO2017/assets/common/downloads/WOO%202017.pdf (aufgerufen am 13.12.2018)
- Schüler, D., Dolega, P., Degreif, S. (2018): Social, economic and environmental challenges in primary lithium and cobalt sourcing for the rapidly increasing electric mobility sector. Internet: http://www.stradeproject.eu/fileadmin/user_upload/pdf/STRADE_PB_Li_Co_EMobility.pdf (aufgerufen am 19.12.2018).
- Stahl et al. (2018): Study in support of evaluation of the Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators – Final Report, Öko-Institut e.V, Trinomics B.V., Ernst & Young, on behalf of European Commission, DG Environment, October 2018.
- USGS (2018): Mineral Commodity Summaries 2018. Internet: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2018/mcs2018.pdf> (19.12.2018).

7. Anhang

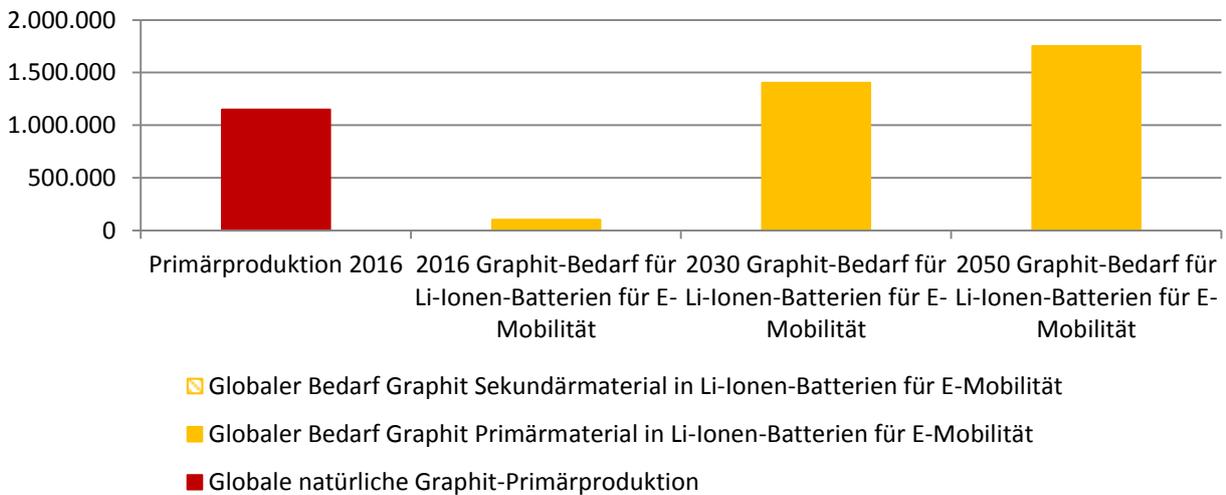
Rohstoffbedarf in Tonnen Silizium im B2DS Szenario



Rohstoffbedarf in Tonnen Kupfer im B2DS Szenario



Rohstoffbedarf in Tonnen Graphit im B2DS Szenario



Pkw: Annahme Anteile Batterietypen

Batterietyp		Anteile der Batterietypen im Verkauf		
		2016	2030	2050
BEV	NMC 1:1:1	32,4%	-	-
	NMC 5:3:2	3,6%	-	-
	NMC 6:2:2	-	45%	-
	NMC 8:1:1	-	45%	54%
	NMC 90:5:5	-	-	36%
	NCA	16%	10%	10%
	LMO	12%	-	-
	LFP	36%	-	-
HEV	NMC 6:2:2	-	100%	-
	NMC 8:1:1	-	-	100%
	NiMH	100%	-	-
PHEV	NMC 1:1:1	45%	-	-
	NMC 5:3:2	5%	-	-
	NMC 6:2:2	-	50%	-
	NMC 8:1:1	-	50%	100%
	LFP	50%	-	-
FCEV	NMC 1:1:1	90%	-	-
	NMC 5:3:2	10%	-	-
	NMC 6:2:2	-	50%	-
	NMC 8:1:1	-	50%	100%
ICE	48V: NMC 6:2:2	-	100%	100%

Annahmen durchschnittliche Batteriekapazität: Pkw

Batterietyp		Durchschn. Kapazität	
		2016	2030 / 2050
BEV	NMC	30 kWh	50 kWh
	NCA	80 kWh	80 kWh
	LMO	30 kWh	-
	LFP	20 kWh	-
HEV	NMC	1 kWh	1 kWh
PHEV	LFP	10 kWh	-
	NMC	10 kWh	20 kWh
FCEV	NMC	2 kWh	4 kWh
ICE	-	-	0,3 kWh

Annahmen durchschnittliche Batteriekapazität und Aufteilung nach Batterietyp: Lkw

		Durchschn. Kapazität		Batterietyp		
		2016 = 2030 = 2050		2016 = 2030 = 2050		
BEV	MFT	100 kWh		Analog zu Pkw		
	HFT	200 kWh				
HEV	MFT	10 kWh				
	HFT	20 kWh				
PHEV	MFT	30 kWh				
	HFT	60 kWh				
FCEV	MFT	10 kWh				
	HFT	30 kWh				
ICE	MFT	Bleibt Blei-Säure		Bleibt Säure	Blei-	Bleibt Blei-Säure
	HFT	Bleibt Blei-Säure		Bleibt Säure	Blei-	Bleibt Blei-Säure

Annahmen durchschnittliche Batteriekapazität und Aufteilung nach Batterietyp: Bus

		Durchschn. Kapazität		Batterietyp		
		2016=2030=2050	2016	2030	2050	
BEV	NMC 6:2:2	300 kWh	-	100%	50%	
	NMC 8:1:1	300 kWh	-	-	50%	
HEV	NMC 6:2:2	30 kWh	-	100%	50%	
	NMC 8:1:1	30 kWh	-	-	50%	
PHEV	NMC 6:2:2	50 kWh	-	100%	50%	
	NMC 8:1:1	50 kWh	-	-	50%	
FCEV	NMC 6:2:2	70 kWh	-	100%	50%	
	NMC 8:1:1	70 kWh	-	-	50%	
ICE	Bus	-	-	-	-	

Annahmen durchschnittliche Batteriekapazität und Aufteilung nach Batterietyp: Minibus

Durchschn. Kapazität		Batterietyp	
		2016=2030=2050	2016=2030=2050
BEV	Minibus	40 kWh	Analog zu Pkw
HEV	Minibus	16 kWh	
PHEV	Minibus	13,5 kWh	
FCEV	Minibus	24 kWh	
ICE	Minibus	-	

Annahmen durchschnittliche Batteriekapazität und Aufteilung nach Batterietyp: Krafträder

Durchschn. Kapazität		Batterietyp		
	2016 / 2030 / 2050	2016	2030	2050
BEV	2016: 2,0 kWh 2030: 2,5 kWh 2050: 2,5 kWh	90% LFP 10% Blei-Säure	80% NMC 1:1:1 15% NMC 6:2:2 5% NMC 8:1:1	5% NMC 1:1:1 50% NMC 6:2:2 45% NMC 90:5:5

Annahmen durchschnittliche Batteriekapazität und Aufteilung nach Batterietyp: Pedelecs

Durchschn. Kapazität		Batterietyp		
	2016 / 2030 / 2050	2016	2030	2050
BEV	2016: 0,5 kWh 2030: 0,7 kWh 2050: 0,7 kWh	50% NMC 1:1:1 50% NCA	80% NMC 1:1:1 15% NMC 6:2:2 5% NMC 8:1:1	5% NMC 1:1:1 50% NMC 6:2:2 45% NMC 90:5:5