



Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität

Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen



Impressum

Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität

Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen

ERSTELLT IM AUFTRAG VON

Agora Verkehrswende

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-verkehrswende.de
info@agora-verkehrswende.de

PROJEKTLEITUNG

Kerstin Meyer
kerstin.meyer@agora-verkehrswende.de

DURCHFÜHRUNG

Öko-Institut e. V.

Büro Darmstadt
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 (0)30 61 51 81 91-0

Dr. Matthias Buchert, Stefanie Degreif, Peter Dolega

Satz: Marica Gehlfuß

Juliane Franz, Agora Verkehrswende

Titelbild: fotolia.com/Galyna Andrushko

Veröffentlichung: Oktober 2017

04-2017-DE

Gedruckt auf 100 % Recycling Naturpapier

DANKSAGUNG

Im Rahmen des Projekts wurde Ende Mai 2017 ein Workshop mit Teilnehmern aus Wirtschaft, Wissenschaft, Zivilgesellschaft, Ministerien und nachgeordneten Behörden durchgeführt. Dieser Workshop diente als Informations- und Diskussionsplattform für den Rohstoffbedarf der Elektromobilität und der sich daraus ergebenden Herausforderungen. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen des Workshops sind in den vorliegenden Endbericht eingeflossen. Wir bedanken uns bei den Teilnehmern für Ihre fachliche Expertise und die konstruktive Diskussion. Die Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen dieser Studie müssen jedoch nicht notwendigerweise die Meinungen der einzelnen Workshop-Teilnehmer widerspiegeln. Die Verantwortung für diese Studie liegt ausschließlich bei Agora Verkehrswende und dem Öko-Institut.

Bitte zitieren als:

Öko-Institut (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende.

Vorwort

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

unsere grundlegende Erkenntnis lautet: Die Verkehrswende ruht auf zwei Säulen – auf der Mobilitätswende und auf der Energiewende im Verkehr.

Die Mobilitätswende ist zwingend erforderlich, um den Energiebedarf des Verkehrs signifikant zu senken – ohne dabei die Mobilität einzuschränken. Nur wenn es gelingt, den Energiebedarf des Verkehrs bis Mitte des Jahrhunderts zu halbieren, wird es die Energiewende im Verkehr ermöglichen, den verbleibenden Energiebedarf nicht mehr über fossile Energieträger, sondern über Erneuerbare zu decken und den Verkehrssektor damit weitestgehend klimaneutral zu gestalten.

Die Elektromobilität ist der Schlüssel für die Energiewende im Verkehr, denn elektrisch betriebene Fahrzeuge sind höchst effizient und können mit zusätzlichem Strom aus Sonne und Wind perspektivisch nahezu klimaneutral betrieben werden. So können wir über die Verbreitung der Elektromobilität fossile Kraftstoffe ersetzen. Auf diese Weise lässt sich nicht nur effektiver Klimaschutz im Verkehrssektor realisieren, es sinkt auch unsere Abhängigkeit von Erdölimporten.

Doch heißt das, dass uns der Klimaschutz automatisch unabhängig macht von Rohstoffimporten? – Das zu glauben wäre eine Illusion. Denn für die Elektromobilität werden eine Reihe von metallischen Rohstoffen und Seltenen Erden benötigt, deren Vorkommen endlich und nichterneuerbar sind. Zudem sind die Vorkommen zum Teil auf wenige Länder beschränkt.

Die rohstoffpolitischen Herausforderungen vieler Zukunftstechnologien, wie auch die der Elektromobilität, hat der ehemalige Chinesische Staatspräsident Deng Xiaopeng auf den Punkt gebracht. Der sagte vor 25 Jahren: „Der Nahe Osten hat das Öl, wir haben die Seltenen Erden.“ Es scheint, als wäre ihm die strategische Bedeutung Seltener Erden und Metalle für die Mobilität von Morgen schon sehr früh bewusst gewesen.

Die Schlüsselrolle ausgewählter Rohstoffe für die Elektromobilität in Verbindung mit der Schlüsselrolle der Elektromobilität für die Dekarbonisierung des Verkehrs-

sektors zeigt eindrücklich die strategische Bedeutung dieser Rohstoffe. Damit stellt sich die Frage, ob die verfügbaren Rohstoffmengen ausreichen, um eine rasche Marktentwicklung der Elektromobilität zu ermöglichen. Oder kann eine eingeschränkte Verfügbarkeit der entsprechenden Rohstoffe sogar zu einem „Showstopper“ für die Elektromobilität werden? – Das ist eine der zentralen Fragestellungen, zu deren Beantwortung wir das Öko-Institut im Rahmen des vorliegenden Gutachtens beauftragt haben.

Zu einer nachhaltigen Rohstoffversorgung zählen auch angemessene Umwelt- und Sozialbedingungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Produkte – von deren Wiege bis zur Bahre. Auch diesen Aspekt haben wir für die wichtigsten Rohstoffe im Rahmen des Vorhabens untersuchen lassen.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Analysen haben wir strategische Handlungsempfehlungen zur nachhaltigen Rohstoffversorgung der Elektromobilität entwickelt. Damit laden wir Sie ein zur gemeinsamen Diskussion. Anregungen, Kommentare und Kritik sind willkommen! Lassen Sie uns gemeinsam daran arbeiten, die Versorgung der Elektromobilität mit nachhaltig gewonnenen Rohstoffen zu sichern, um damit zur klimaneutralen Mobilität von Morgen beizutragen!

Christian Hochfeld

für das Team von Agora Verkehrswende
Berlin, 05. Oktober 2017

Inhalt

Zusammenfassung	7
Summary	9
01 Zentrale Fragestellungen	11
02 Globale Szenarien für Elektromobilität bis 2030/2050	13
03 Globale Nachfrageentwicklung wichtiger Rohstoffe für Elektromobilität	25
3.1. Lithiumbedarf für die Elektromobilität	25
3.2. Kobaltbedarf für die Elektromobilität	27
3.3. Nickelbedarf für die Elektromobilität	29
3.4. Graphitbedarf für die Elektromobilität	29
3.5. Platinbedarf für die Elektromobilität (inklusive Autoabgaskatalysatoren)	32
3.6. Exkurs Seltene Erden	34
04 Potenzielle Herausforderungen: Fiktive oder reale Flaschenhalse?	37
4.1. Sind physische Limitierungen/Verknappungen von Rohstoffen für die Elektromobilität ein reales Szenario?	37
4.2. Sind temporäre Verknappungen möglich?	42
4.3. Kann die Elektromobilität durch extreme Preissteigerungen für strategische Rohstoffe ausgebremst werden?	44
4.4. Können vermehrt negative sozioökonomische und ökologische Auswirkungen infolge zusätzlicher Primärförderung entstehen?	47

05 Lösungsstrategien	53
06 Strategische Handlungsempfehlungen	55
6.1. Globale Industrieallianz für nachhaltiges Lithium	55
6.2. Verpflichtende unternehmerische Sorgfaltspflichten (<i>Due Dilligence</i>) für Kobalt	57
6.3. Internationale Kooperation nachhaltiger Bergbau	58
6.4. Weiterentwicklung EU-Batterierichtlinie	59
6.5. Weltweites Recyclingsystem für Lithium-Ionen-Batterien	60
6.6. Forschungsoffensive Batterietechnologien	61
6.7. Rohstoffradar Elektromobilität	61
07 Anhang	63
7.1. Anwendungsbereiche der relevanten Rohstoffe und Bedarf über alle Anwendungen	63
7.2. Batteriekapazitäten	70
Literaturverzeichnis	73
Abbildungsverzeichnis	76
Tabellenverzeichnis	77

Zusammenfassung

Die Elektromobilität ist der Schlüssel für die Energiewende im Verkehr. Die Dekarbonisierung des Verkehrs erfordert weltweit einen schnellen, robusten und weitreichenden Markthochlauf elektrisch angetriebener Fahrzeuge mit Batterien oder auch mit Brennstoffzellen. Nach Lage der Dinge lassen sich nur auf diese Weise fossile Kraftstoffe ersetzen, deren Nutzung maßgeblich zur Erderwärmung beiträgt. Doch sowohl für Batterien (Lithium, Kobalt, Nickel, Graphit) als auch für Brennstoffzellen (Platin) sind eine Reihe von knappen, nichterneuerbaren Rohstoffen erforderlich, deren Vorkommen auf einige Länder beschränkt sind.

Die vorliegende Studie befasst sich mit der Frage, ob für den zwecks Klimaschutz weltweit notwendigen Markthochlauf der Elektromobilität genügend Rohstoffe vorhanden sind. Des Weiteren wird untersucht, wie sich die Marktpreise zentraler Rohstoffe entwickeln könnten und wie eine hinsichtlich Umwelt- und Sozialkriterien nachhaltige Rohstoffförderung sicherzustellen ist.

Hierzu wurden auf Basis von Klimaschutz-Szenarien der Internationalen Energieagentur (International Energy Agency, IEA) zur Technologieentwicklung und zur prognostizierten Entwicklung der Verkaufszahlen von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen (Pkw, Lkw, Busse, Krafträder und Pedelecs) die weltweiten Rohstoffbedarfe für die Elektromobilität in den Jahren 2030 und 2050 geschätzt.¹ Darauf aufbauend wurde analysiert, ob und zu welchen Bedingungen hinreichend Rohstoffe für die Elektromobilität zur Verfügung stehen.

1 Dabei wird davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2050 weiterhin Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz kommen. Sollten in der Zwischenzeit andere, heute noch nicht kommerziell nutzbare Batterietechnologien verwendet werden, sind die Herausforderungen zur nachhaltigen Rohstoffversorgung neu zu diskutieren.

Zentrale Ergebnisse

- 1** Die Rohstoffe Lithium, Kobalt, Nickel, Graphit und Platin sind für ein schnelles weltweites Wachstum der Elektromobilität ausreichend vorhanden. Die weltweiten Vorkommen übersteigen den prognostizierten Bedarf jeweils deutlich. Dies ist selbst dann der Fall, wenn der Rohstoffbedarf gleichzeitig durch Nachfrage für andere Anwendungsbereiche weiter ansteigt.
- 2** Temporäre Verknappungen oder Preissteigerungen für einzelne Rohstoffe – insbesondere für Lithium und Kobalt – sind nicht auszuschließen. Das ist vor allen Dingen darauf zurückzuführen, dass nicht garantiert werden kann, dass alle neu zu erschließenden Förderstätten rechtzeitig fertig gestellt werden oder dass der Export aus den Förderländern zu jeder Zeit in ausreichenden Mengen garantiert werden kann.
- 3** Die Förderung von Rohstoffen für die Elektromobilität ist mit Umwelt- und Sozialproblemen verbunden – wie die Förderung vieler anderer Rohstoffe für andere Verwendungszwecke auch. Zu nennen sind insbesondere ein oft sehr hoher Energiebedarf, das Entstehen saurer Grubenwässer, Wasserkonflikte zwischen Bergbauunternehmen und indigenen Völkern sowie nicht vertretbare Arbeitsbedingungen in Minen. Besonders problematisch ist zurzeit die Kobaltförderung im Kleinbergbau in der Demokratischen Republik Kongo einzuschätzen, wo der Großteil der bekannten Kobalt-Vorkommen zu finden ist.

Handlungsempfehlungen

Auf Basis dieser Ergebnisse wurden sieben Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität entwickelt. Sie zielen einerseits darauf ab, die Nachfrage nach Primärrohstoffen zu senken, um die Möglichkeit temporärer Verknappungen oder Preissteigerungen zu minimieren. Andererseits werden Maßnahmen mit dem Ziel vorgeschlagen, die Umwelt- und Sozialbedingungen entlang der gesamten Wertschöpfungsketten, vorrangig in den Förderländern der Rohstoffe, zu verbessern. Auf diese Weise würde dafür gesorgt, die gesamten Wertschöpfungsketten ökologisch und sozial nachhaltig zu gestalten.

Dämpfung Nachfrage für Primärrohstoffe

Ein konsequentes Recycling dämpft die Nachfrage nach Primärrohstoffen und wirkt damit als Prophylaxe gegen temporäre Verknappungen und Preissteigerungen, die den Markthochlauf der Elektromobilität behindern könnten. Um die rechtlichen Rahmenbedingungen für ein effizientes Recyclingsystem zu verbessern, wird die **Weiterentwicklung der EU-Batterierichtlinie** speziell für Antriebsbatterien der Elektromobilität empfohlen. Auf diese Weise können rohstoffspezifische Recyclingraten für Lithium, Kobalt, Nickel und Grafit festgeschrieben werden. Zusätzlich zur Weiterentwicklung der rechtlichen Rahmenbedingungen wird der **Aufbau eines weltweiten Recyclingsystems für Lithium-Ionen-Batterien** gefordert. Darüber hinaus wird eine **Forschungsoffensive zu Batterietechnologien** empfohlen. Sie sollte sich auf die Erhöhung der Materialeffizienz konzentrieren, auf die Substitution kritischer Rohstoffe und auf die Weiterentwicklung von Recyclingtechnologien.

Mit einem umfassenden Recycling können auch Umwelt- und Sozialprobleme über die gesamte Wertschöpfungskette von Lithium-Ionen-Batterien vermindert werden.

Verbesserung von Umwelt- und Sozialbedingungen der Förderung

Um die Umwelt- und Sozialbedingungen bei der Förderung der für die Elektromobilität essentiellen Rohstoffe zu verbessern, wird eine **(globale) Industrieallianz für nachhaltiges Lithium** empfohlen. Zentrales Ziel dieser Initiative ist es, Standards für die umwelt- und sozialverträgliche Gewinnung von Primärlithium zu erarbeiten und deren Umsetzung zu fördern. Vor dem Hintergrund der problematischen Förderung von Kobalt in der Demokratischen Republik Kongo werden **verpflichtende unternehmerische Sorgfaltspflichten (Due Dilligence) für Kobalt** empfohlen. Solche Sorgfaltspflichten haben sich bereits für andere so genannte Konfliktmineralien als zielführend erwiesen, um Gesundheits-, Sozial und Umweltrisiken entlang von Handelsketten zu minimieren. Auch die Stärkung der **Internationalen Kooperation zum nachhaltigen Bergbau** kann dazu beitragen und die langfristige Rohstoffversorgung sichern.

Um bei den Strategien zur nachhaltigen Rohstoffversorgung der Elektromobilität der zukünftig zu erwartenden dynamischen Marktentwicklung Rechnung tragen zu können, wird ein **Rohstoffradar Elektromobilität** zum regelmäßigen Monitoring empfohlen. Auf diese Weise sollen möglichst frühzeitig potenzielle Versorgungsengpässe oder Preissteigerungen erkannt und Gegenmaßnahmen ergriffen werden können.

Summary

Electric vehicles are the key to decarbonising the transport sector. Indeed, research shows that the rapid, robust and widespread adoption of vehicles powered with electricity from batteries or fuel cells is essential for the global transport sector to become climate-neutral by 2050. However, a range of non-renewable materials that are only mined in a limited range of countries are required to manufacture batteries and fuel cells. This study examines whether these commodities (i.e. lithium, cobalt, nickel and graphite for batteries, and platinum for fuel cells) are available in sufficient quantities for the large-scale production of electric vehicles. In this connection, it explores how market prices for key commodities could potentially develop in coming decades. It also considers measures for ensuring raw-materials mining is socially and environmentally sustainable.

The study's estimates are based on the climate protection scenarios developed by the International Energy Agency (IEA). Specifically, we estimate the commodity needs in 2030 and 2050 that would be associated with the IEA's forecasts for growth in electric-powered trucks, cars, buses, motorcycles and pedelecs. Our study assumes continued use of lithium-ion batteries up to 2050.²

-
- 2 We assume that lithium-ion batteries are the dominant battery type up to 2050. Our conclusions with regard to the future availability of raw materials would need to be re-assessed if new battery technologies that are not used commercially today were to achieve widespread adoption.

Key Findings

- 1** Lithium, cobalt, nickel, graphite and platinum are available in sufficient quantities to enable the rapid, worldwide adoption of electric vehicles. Proven global reserves in each case greatly exceed forecasted demand, even when factoring in rising demand for these raw materials for other technological applications.
- 2** Temporary supply bottlenecks and price increases are possible, particularly for cobalt and lithium. This is predominantly attributable to two factors: First, some new mining sites may not be operational in due time. Second, source countries may not be able to export raw materials in sufficient quantities at all times.
- 3** The extraction of raw materials is inherently associated with environmental and social problems, and the commodities needed for battery technology are no exception in this regard. The problems in this area are multifarious and include the high energy consumption of mining operations, acid mine drainage, water conflicts between mining companies and indigenous peoples, and poor working conditions in mines. The artisanal mining in the Democratic Republic of Congo, where most known cobalt reserves are located, is a particularly egregious example of such problems.

Recommendations for Action

In light of our findings we have developed seven recommendations for action to safeguard the supply of raw materials needed to manufacture electric vehicle batteries and fuel cells. On the one hand, these recommendations seek to reduce the demand for primary raw materials in order to minimise the possibility of temporary bottlenecks or price increases. On the other hand, our recommendations are designed to improve environmental and social conditions across the entire commodities supply chain, particularly in source countries. This, in turn, should improve the integrity and reliability of supply networks.

Reducing demand for primary raw materials

Systematic recycling of the raw materials used to produce batteries and fuel cells would reduce demand for primary raw materials. As a result, recycling would help to ward off temporary production bottlenecks and associated price increases that could impair the adoption of electric vehicles. In order to improve the legal basis for an efficient recycling system, we recommend **reforming the EU Battery Directive**. A revised directive could establish quotas for the recycling of lithium, cobalt, nickel, and graphite. We also recommend the development of a **global recycling system for lithium-ion batteries**. Moreover, we advocate a **research offensive in the area of battery technology** in order to promote material efficiency, the use of substitute materials and the improvement of recycling techniques.

Beyond reducing demand for raw materials, a comprehensive recycling system could alleviate environmental and social problems across the entire supply chain for lithium-ion batteries.

Improving Environmental and Working Conditions in Raw Materials Extraction

In order to improve the environmental and working conditions associated with the mining of raw materials necessary for manufacturing electric vehicles, we recommend the establishment of a **global industrial alliance for sustainable lithium**. The goal of this initiative would be to develop and implement standards to ensure raw materials extraction is socially and environmentally sustainable. Against the backdrop of the problematic mining of cobalt in the Democratic Republic of Congo, we recommend that companies adopt a **Due Diligence Codex for Cobalt**. Such due diligence practices have previously proven beneficial for minimising the risks posed by conflict materials for workers, human health and the environment. One route for supporting the adoption of such practices is by promoting **international cooperation in sustainable mining**. Cooperative activities in this area should aim to facilitate the sharing of technology and knowledge that enables sustainable industrial and artisanal mining practices. Such activities would have the added benefit of enhancing security of supply for important raw materials.

As one cannot forecast the precise developments that will be witnessed in the coming years and decades in the dynamic market for the commodities needed to fuel the rise of electric vehicles, we advocate the adoption of an **Electric Vehicle Commodities Radar** to monitor the availability of raw materials on an ongoing basis. The goal of such a monitoring system would be to anticipate supply bottlenecks and price increases as well as to enable the implementation of targeted countermeasures.

01 | Zentrale Fragestellungen

Die Übereinkunft von Paris und der Klimaschutzplan 2050 setzen deutliche CO₂-Minderungsziele im Verkehrssektor. Diese sind nur mit einem deutlichen Anstieg der Fahrzeugelektrifizierung zu erreichen. Elektrofahrzeuge zeichnen sich durch besondere Komponenten aus wie etwa den Elektroantriebsmotor, die Batterie, die Brennstoffzelle oder die Leistungselektronik. Für diese Komponenten werden Technologiematerialien wie Seltene Erden, Lithium, Platin, Naturgraphit, Synthesegrafit oder Kobalt benötigt.

Im Jahr 2011 wurde deutlich, dass Exportrestriktionen von Hauptförderländern deutliche Auswirkungen auf die Versorgung mit notwendigen Technologiemetallen haben können. So stiegen die Preise der Seltenen Erden im Jahr 2011 explosionsartig in die Höhe und führten auch physisch temporär zu einem Versorgungsengpass. Können in Zukunft entsprechende Ereignisse auch bei anderen relevanten Rohstoffen für die Elektromobilität eintreten?

Dieses Synthesepapier für Agora Verkehrswende befasst sich intensiv mit den relevanten Rohstoffen für die zentralen Elektromobilitätskomponenten Batterie und Brennstoffzelle. In die Untersuchung des Öko-Instituts

sind hierzu neueste Erkenntnisse und Daten eingeflossen. Dafür wird auf Basis von Szenarioannahmen der Bedarf an Rohstoffen ermittelt. Der Fokus des Synthesepapiers liegt auf den Batterien und Brennstoffzellen und hier auf den strategischen Rohstoffen Lithium, Kobalt, Nickel, Grafit und Platin.

Dieses Synthesepapier beschäftigt sich mit folgenden zentralen Fragestellungen: Wie entwickelt sich durch die Elektromobilität die globale Nachfrage nach strategischen Rohstoffen? Was sind potentielle Herausforderungen und was sind fiktive oder reale Flaschenhälse? Was sind Lösungsstrategien und Handlungsempfehlungen? Zu diesen werden in Unterkapiteln jeweils detaillierter weitere Aspekte des Themas behandelt, um dem Themenkomplex ausreichend gerecht zu werden.

02 | Globale Szenarien für Elektromobilität bis 2030/2050

Einleitung

Im Jahr 2015 überholten erstmals Batterien den Keramik- und Glassektor als wichtigstes Anwendungsgebiet für Lithium. Diese Entwicklung wurde maßgeblich durch die steigende Nachfrage nach elektrischen Fahrzeugen angetrieben. Dementsprechend ist die Zunahme der Verkaufszahlen von entsprechenden Fahrzeugen maßgeblich prägend für die künftige Nachfrage nach einigen strategischen Rohstoffen. Ein wichtiges Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung des jährlichen globalen Rohstoffbedarfs für die Elektromobilität und die daraus entstehenden Herausforderungen. Hierfür werden Szenarien betrachtet, aus denen hervorgeht, wie hoch die Jahresverkäufe elektrisch betriebener Fahrzeuge sein könnten.

das *Global Change Assessment Model* (GCAM) vom *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL), *MESSA-GE-Transport* vom *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA), das *Roadmap Model* vom *International Council on Clean Transportation* (ICCT) und das *Mobility Model* (MoMo) der *International Energy Agency* (IEA), (Yeh et al. 2016). Aufgrund der detaillierten Daten, ihrer Aktualität und der zumindest teilweise öffentlichen Zugänglichkeit der Studie beziehen sich die Hochrechnungen in dieser Arbeit auf Szenarien der IEA. In diesem Synthesepapier werden ein Positivszenario, welchem das eben genannte Zwei-Grad-Ziel zugrunde liegt (2DS-Szenario), sowie ein Referenzszenario (4DS), welches einer globalen Erwärmung um vier Grad Celsius bis 2100 entspricht, verwendet. (IEA 2016 a)

Szenarienauswahl

Unterschiedliche Organisationen, Institutionen und Unternehmen veröffentlichen diverse Mobilitätsszenarien, die sich in ihren Annahmen und daraus resultierenden Projektionen deutlich unterscheiden. Eine gängige Annahme unabhängiger Institutionen für ein Positivszenario ist die maximale Zunahme der globalen Durchschnittstemperatur um zwei Grad Celsius bis zum Jahr 2100. Vergleichbare Modelle, welche unter anderem dieses Szenario zugrunde legen, sind beispielsweise

Kurzmethodik

Im Rahmen des Synthesepapiers werden vom Öko-Institut basierend auf Daten der IEA jeweils zwei Szenarien für die Entwicklung der Verkaufszahlen von Pkws, Lkws, Bussen sowie Krafträdern³ und Pedelecs bis ins Jahr 2050 abgeleitet. Neben der Unterscheidung nach Fahrzeugtyp werden die unterschiedlichen Antriebsarten differenziert (siehe Tabelle 2.1). Aus Bestandszahlen

3 Umfasst: Motorräder, Mopeds, Scooter, Roller

In der vorliegenden Arbeit unterschiedene Antriebsarten für Fahrzeuge		Tabelle 2.1
Internal Combustion Engine (ICE)	diesel- und benzinbetriebene Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor	
Hybrid Electric Vehicle (HEV)	Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und Elektromotor mit kleiner Batterie, die nicht extern geladen werden kann	
Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)	Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor und Elektromotor mit größerer Batterie, die extern geladen werden kann	
Battery Electric Vehicle (BEV)	batteriebetriebenes Elektrofahrzeug mit großer Batterie	
Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)	Brennstoffzellenfahrzeug	

Zusammenstellung Öko-Institut e. V.

der IEA werden, mithilfe der Gauss-Verteilung, unter Annahme bestimmter *End-of-Life-Zyklen* die jährlichen Verkaufszahlen nach Fahrzeugtyp und Szenario abgeleitet. Für das Basisjahr 2015 werden weitestgehend offizielle Verkaufsstatistiken herangezogen. Damit ist die Hochrechnung des Jahresbedarfs von Rohstoffen für die Stützjahre 2015, 2030 und 2050 möglich.

Szenarienbeschreibung

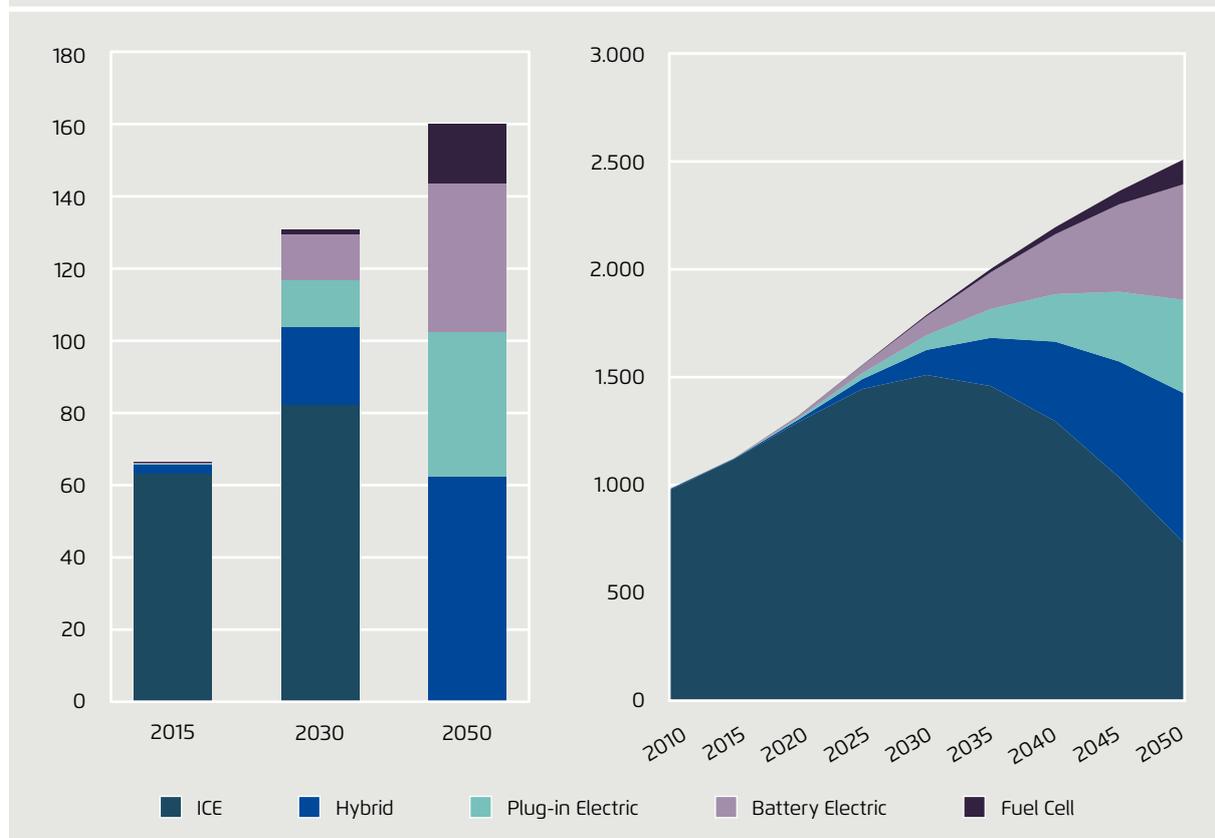
Im 4DS-Szenario wird von einer Entwicklung ausgegangen, welche die durchschnittliche globale Temperaturerhöhung bis 2100 auf vier Grad Celsius begrenzt. Moderate politische und technische Fortschritte werden vorausgesetzt, um dieses Ziel zu erreichen. In diesem Szenario werden in erster Linie Maßnahmen fort-

geschrieben, die bereits in Kraft sind oder angekündigt wurden. Das 4DS-Szenario ist allerdings als sehr konservativ und nicht wünschenswert für den Klimaschutz einzustufen, da die internationalen Klimaschutzziele hier nicht erreicht werden.

Der Fokus der Studie liegt auf dem 2DS-Szenario, welches eine Entwicklung prognostiziert, die den durchschnittlichen globalen Temperaturanstieg bis 2100 auf zwei Grad Celsius begrenzt. Hierzu werden ambitionierte politische (stärkerer Anteil ÖPNV usw.) und technische Entwicklungen vorausgesetzt. Um die projizierten Ziele zu erreichen, sollen nach IEA die Kosten für den Einsatz von Verbrennerfahrzeugen mit hohen Emissionen steigen, beispielsweise durch eine Erhöhung der Kraftstoffsteuer und das Streichen sämtlicher Subventionen konventioneller Antriebe. Die Höhe der

Jährliche Verkäufe (links) und Bestand (rechts) von Pkws nach dem 2DS-Szenario (Millionen Fahrzeuge)

Abbildung 2.1



Bestand nach IEA 2016a; jährliche Verkäufe eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e. V.

Kfz-Steuern soll sich an der Menge der Fahrzeugemissionen orientieren, daraus resultierende zusätzliche Steuereinnahmen fließen in Infrastruktur sowie Forschung und Entwicklung (IEA 2016 a).

Pkw

Im Basisjahr 2015 werden global insgesamt etwa 66 Millionen Pkw verkauft, der Bestand liegt bei knapp 1,1 Milliarden Fahrzeugen. Der Verkauf elektrischer Fahrzeuge liegt global bei circa 330.000 batteriebetriebenen Pkws sowie 220.000 Plug-in-Hybriden. Die Hybrid-Verkäufe lagen bei etwa 2,62 Millionen. Damit machen die Verkäufe alternativer Antriebe bei Pkws circa 0,01 Prozent (circa 5 Prozent inklusive Hybride) der Jahresverkäufe im Basisjahr aus.

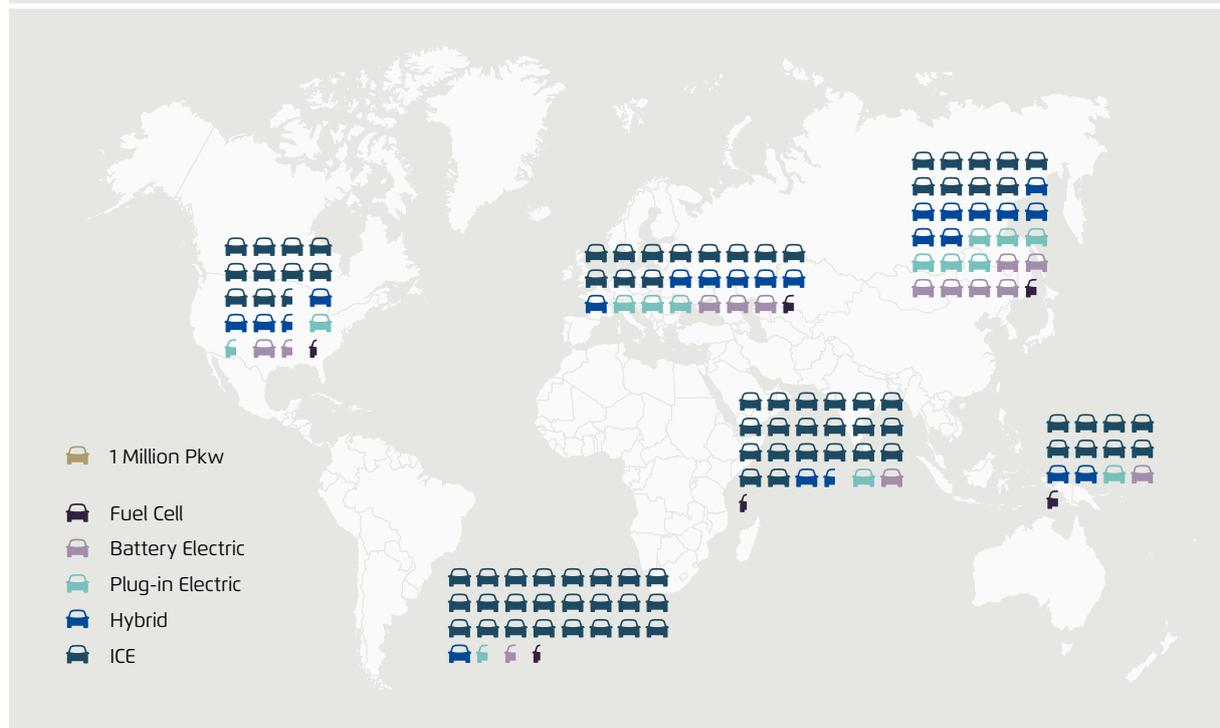
Bis 2030 kommt es im 2DS-Szenario zu einer Verdoppelung der Gesamtverkäufe, wobei der Absatz konventioneller Antriebe nur geringfügig ansteigt. Das Gesamt-

wachstum wird primär durch den Mehrverkauf von Battery Electric Vehicles (BEVs), Plug-ins und Hybriden getragen; zudem werden geringe Stückzahlen von Brennstoffzellenfahrzeugen verkauft (siehe Abbildung 2.2). Gleichzeitig steigt der Bestand auf circa 1,8 Milliarden Einheiten und erreicht den Peak bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Alternative Antriebe (inklusive Hybride) machen im Jahr 2030 nach dem 2DS-Szenario schon etwa 16 Prozent des Bestands und rund 37 Prozent der Verkäufe aus. Hierbei werden BEVs und Plug-ins jeweils etwa 13 Millionen Mal verkauft, Hybride knapp 22 Millionen Mal (siehe Abbildung 2.1 und Tabelle 2.2).

Im Jahr 2050 werden im 2DS-Szenario keine Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren mehr verkauft und machen nur noch rund ein Viertel des gesamten Fahrzeugbestands aus. Die Gesamtverkäufe steigen auf etwa 160 Millionen Einheiten, davon sind mehr als ein Drittel Hybride, jeweils ein Viertel Plug-ins und BEVs sowie circa ein Zehntel brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge. Der Gesamtbestand erreicht etwa 2,5 Milliarden Fahr-

Globale Verteilung der Pkw-Verkäufe im Jahr 2030 nach dem 2DS-Szenario

Abbildung 2.2



Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e. V. nach IEA 2016 a

zeuge im Jahr 2050 (siehe Abbildung 2.1, Abbildung 2.3 und Tabelle 2.2).

Insgesamt zeichnet sich damit im 2DS-Szenario ein signifikanter Anstieg alternativer Antriebe ab. Verglichen mit dem 4DS-Szenario ist im Jahr 2030 schon eine deutlich höhere Elektrifizierung zu erkennen. Selbst im Jahr 2050 bleibt das 4DS-Szenario mit 28 Prozent alternativer Antriebe (inklusive Hybride) noch unter dem Niveau vom 2DS-Szenario im Jahr 2030, in dem bereits 37 Prozent der Verkäufe keine Verbrenner sind (inklusive Hybride). Weiterhin wird beim Vergleich des Bestands und der Verkaufszahlen deutlich, dass im 4DS-Szenario mehr auf den Individualverkehr gesetzt wird. Im Jahr 2050 erreicht der Bestand im 4DS-Szenario fast 3 Milliarden Pkws, während im 2DS-Szenario 2,5 Milliarden Einheiten im Bestand sind. Auch bei den Verkäufen liegt das 4DS-Szenario deutlich höher, so werden mit etwa 210 Millionen Pkws circa 50 Millionen Einheiten mehr verkauft als im 2DS-Szenario (siehe Tabelle 2.2).

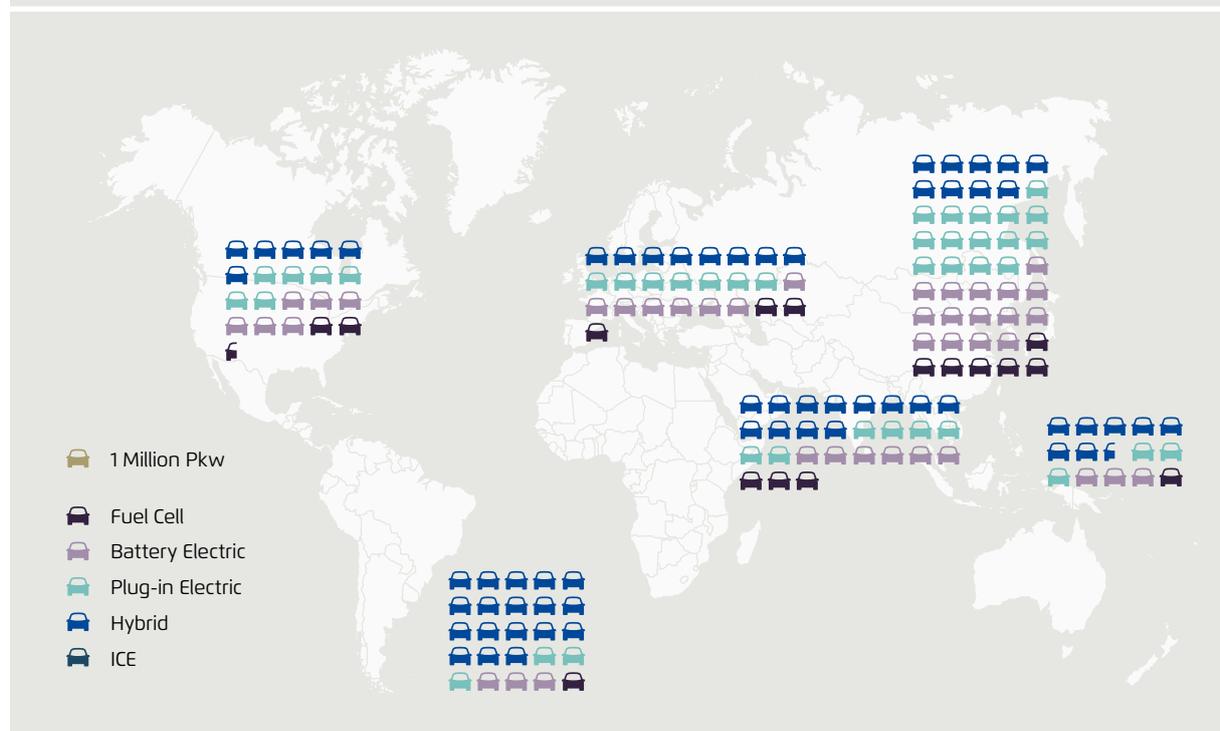
Lkw

Im 2DS-Szenario ist die Entwicklung der Lkw-Verkaufszahlen weniger drastisch als bei den Pkw. Von 2015 bis 2050 kommt es zu einem Gesamtanstieg der Verkaufszahlen von etwa 70 Prozent, im gleichen Zeitraum steigen die Pkw-Verkaufszahlen um fast 250 Prozent. In erster Linie ist dies durch eine stärkere Verlagerung des Güterverkehrs von der Straße hin zum Schienen- und Schiffsverkehr zu erklären, welcher im 2DS-Szenario angenommen wird.

Auch bei den Lkw kommen ab dem Jahr 2030 im 2DS-Szenario alternative Antriebe verstärkt zum Einsatz. Knapp 30 Prozent aller Verkäufe fallen nicht auf rein konservative Antriebe (siehe Abbildung 2.4). Allerdings ist bei den Lkw aufgrund der Reichweitenbegrenzung von batteriebetriebenen Antrieben eine deutliche Tendenz zu Hybriden und Plug-in-Fahrzeugen erkennbar. Zwischen 2025 und 2030 wird der Peak beim Lkw-Fahrzeugbestand mit Verbrennungsmotor erreicht. Dies spiegelt sich auch in den sinkenden Verkaufszahlen

Globale Verteilung der Pkw-Verkäufe im Jahr 2050 nach dem 2DS-Szenario

Abbildung 2.3



Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e. V. nach IEA 2016 a

Jährliche Verkaufszahlen Pkws nach Antrieb und Szenario (Millionen Fahrzeuge)

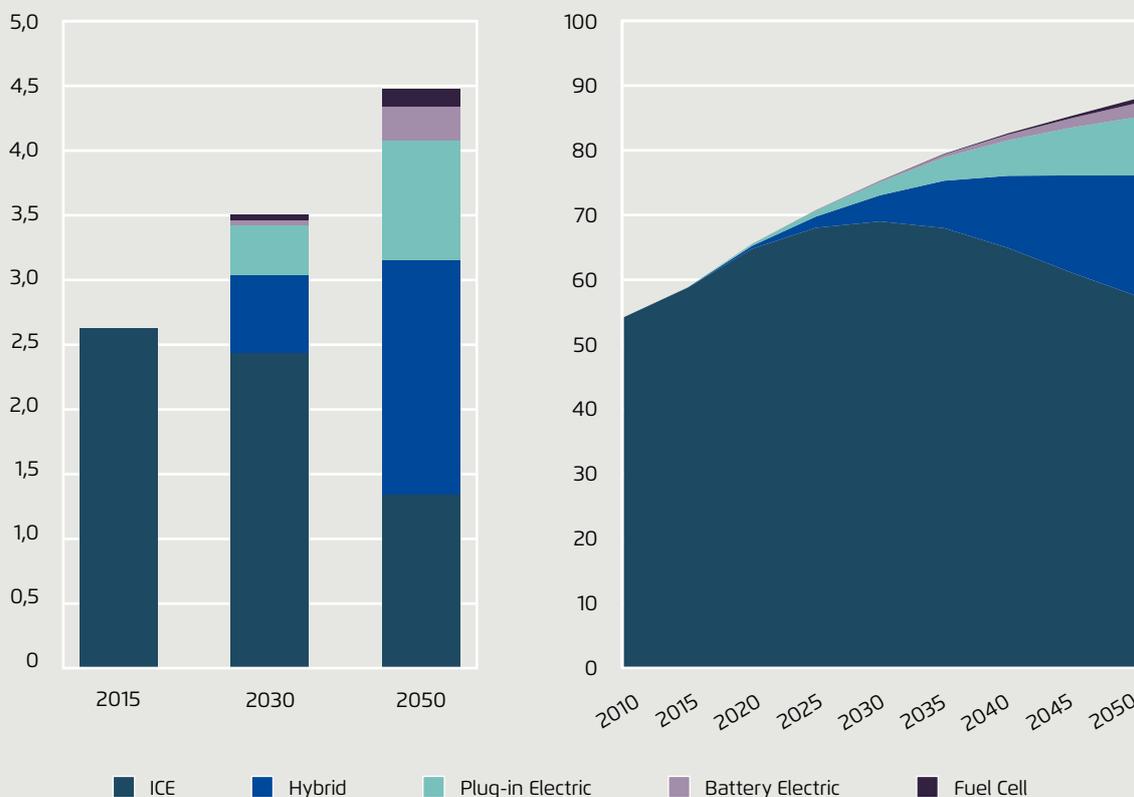
Tabelle 2.2

	2015	2030		2050	
	Startjahr	2DS	4DS	2DS	4DS
ICE	63,14	82,20	133,33	0,00	151,93
Hybrid	2,62	21,65	5,57	62,27	44,96
Plug-in Electric	0,22	12,90	1,72	40,22	6,85
Battery Electric	0,33	12,71	2,02	41,04	7,29
Fuel Eell	0,00	1,27	0,37	16,40	1,52
Total	66,31	130,72	143,01	159,92	212,55

Eigene Berechnung Öko-Institut e. V. nach IEA 2016 a

Jährliche Verkäufe (links) und Bestand (rechts) von Lkw nach dem 2DS-Szenario (Millionen Fahrzeuge)

Abbildung 2.4



Bestand nach IEA 2016a; jährliche Verkäufe eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e. V.

von Verbrenner-Lkw ab 2030 wider. 2050 machen konservative Antriebe weniger als ein Drittel der Verkäufe aus, Hybride steuern 40 Prozent bei und Plug-ins etwa ein Fünftel. Batteriebetriebene und brennstoffzellenbetriebene Lkw haben mit 6 Prozent und 3 Prozent eher kleine Anteile an den Verkaufszahlen. Der Fahrzeugbestand steigt insgesamt kontinuierlich an, sodass im Jahr 2050 knapp 90 Millionen Lkw auf den Straßen sind. Damit sind nach dem 2DS-Szenario etwa so viele Lkw im Bestand wie die Jahresverkäufe elektrischer Pkw in 2050 (BEV, Plug-in, FCEV).

Das 4DS-Szenario ist deutlich stärker vom Gütertransport über den Straßenweg geprägt, was sich auch in den Verkaufszahlen und dem Bestand widerspiegelt. Im Jahr 2050 liegen die Verkaufszahlen mit sieben Millionen

Lkws (davon 72 Prozent ICE) über 50 Prozent und der Bestand mit über 100 Millionen knapp 20 Prozent höher als die Zahlen im 2DS-Szenario.

Busse

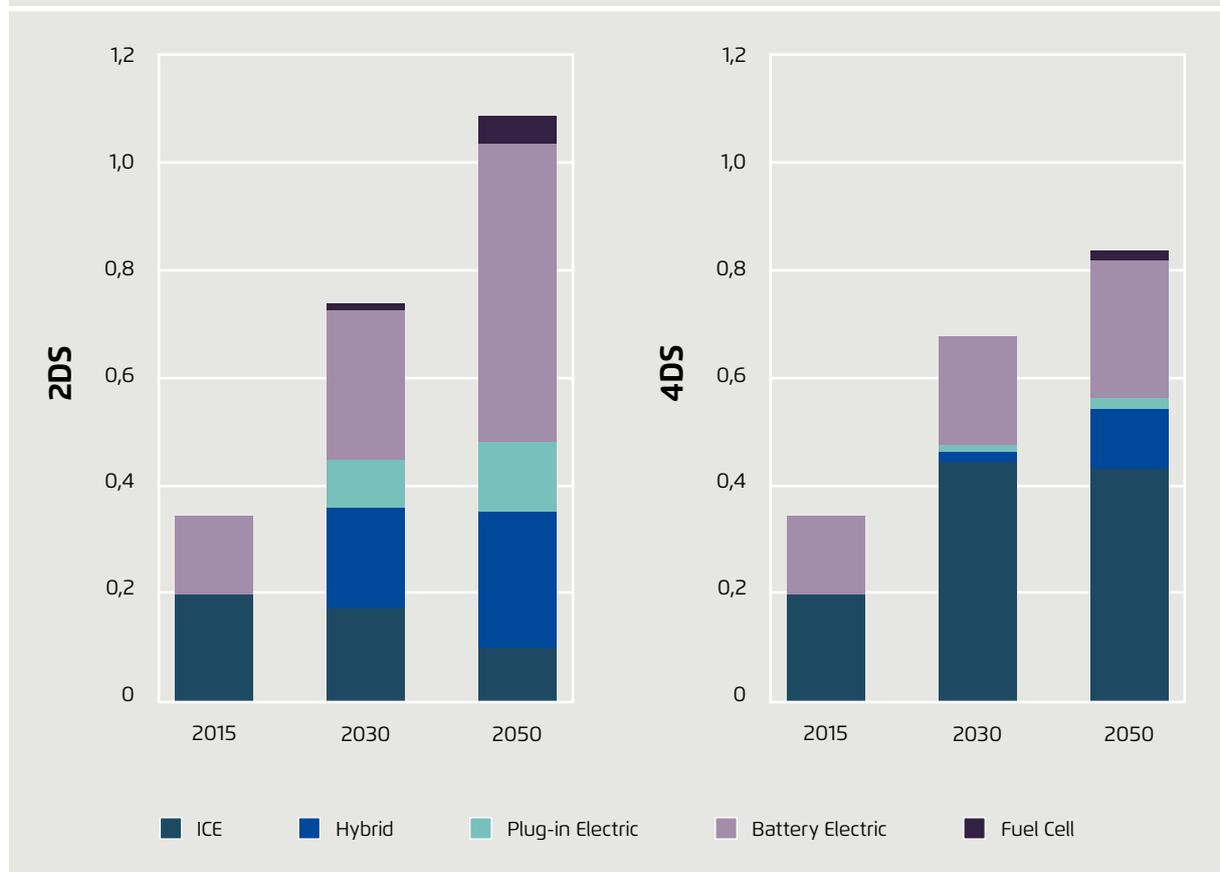
Die Verkaufszahlen von Bussen werden abweichend⁴ zu den restlichen Fahrzeugtypen ermittelt, da in der IEA-Studie keine Daten zu Bussen vorlagen (IEA 2016a). Basierend auf aktuellen Busproduktionszahlen der Internationalen Automobilherstellervereinigung (OICA⁵)

4 Eigene Annahmen Öko-Institut

5 Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles (OICA)

Jährliche Verkäufe von Bussen nach dem 2DS-Szenario (links) und dem 4DS-Szenario (rechts) (Millionen Fahrzeuge)

Abbildung 2.5



Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V.

und auf Informationen zum Verkauf elektrischer Busse in China werden die Zahlen für das Basisjahr ermittelt. Im Jahr 2015 werden 140.000 elektrische Busse in China verkauft, andere Länder sind vernachlässigbar, so haben Indien mit 100, Niederlande mit 94, Schweden mit 30 und Japan mit 21 elektrischen Bussen im Bestand nur marginalen Anteil an den globalen Verkäufen im Basisjahr (IEA 2016 b).

Im 2DS-Szenario wird eine Abkehr vom Individualverkehr angenommen, sodass verstärkt auf den ÖPNV gesetzt wird. Damit geht ein wesentlich stärkerer Anstieg von Busverkäufen als im 4DS-Szenario einher. Das Wachstum der Verkaufszahlen im 2DS-Szenario ist dementsprechend an das Wachstum der Pkw-Verkaufszahlen im 4DS-Szenario angelehnt. Dem 4DS-Szenario liegt entsprechend das 2DS-Wachstum der Pkw-Verkäufe zugrunde. Die Unterteilung der unterschiedlichen Antriebe ist an den Szenarien der Lkw angelehnt. Trotz der Ähnlichkeit zu Lkw werden im Busbereich verstärkt batterieelektrische Antriebe verbaut. Busse werden vorwiegend im urbanen Raum genutzt und haben so Zugang zu passender Ladeinfrastruktur. Darüber hinaus ergeben sich fahrplanbedingt Zeitfenster, in denen das Laden der Batterie möglich ist.

Im 2DS-Szenario verdreifachen sich die Busverkäufe zwischen 2015 und 2030, während die Verkäufe konservativer Antriebe absolut abnehmen. Insbesondere der Verkauf batterieelektrisch angetriebener Busse nimmt deutlich zu, sodass im Jahr 2050 nach dem 2DS-Szenario eine halbe Million Einheiten verkauft werden, die damit mehr als 50 Prozent der Gesamtverkäufe repräsentieren (siehe Abbildung 2.5).

Verglichen mit den Verkaufszahlen von Lkw spielen Busse eine weitaus geringere Rolle. Im 2DS-Szenario werden im Jahr 2050 mehr als vier Mal so viele Lkw wie Busse verkauft.

Krafträder

Sowohl Statistiken als auch Hochrechnungen zu Kraft-rädern sind aufgrund von Definitionsunterschieden häufig nicht miteinander vergleichbar. Die Bestandszahlen der IEA beziehen sich auf 2- und 3-Wheeler. Unter diesen Begriff können je nach Definition auch Pedelecs

fallen. In der folgenden Hochrechnung sind Pedelecs nicht mit inbegriffen und werden an späterer Stelle separat thematisiert. Allerdings ist aufgrund der eingangs genannten Definitionsproblematik davon auszugehen, dass die Szenarien mit einer größeren Unsicherheit behaftet sind als bei den anderen Fahrzeugtypen. Bei den Krafträdern werden nur zwei Antriebsarten unterschieden, zum einen der konventionelle benzinbetriebene Antrieb und zum anderen die batterieelektrisch betriebenen Fahrzeuge.

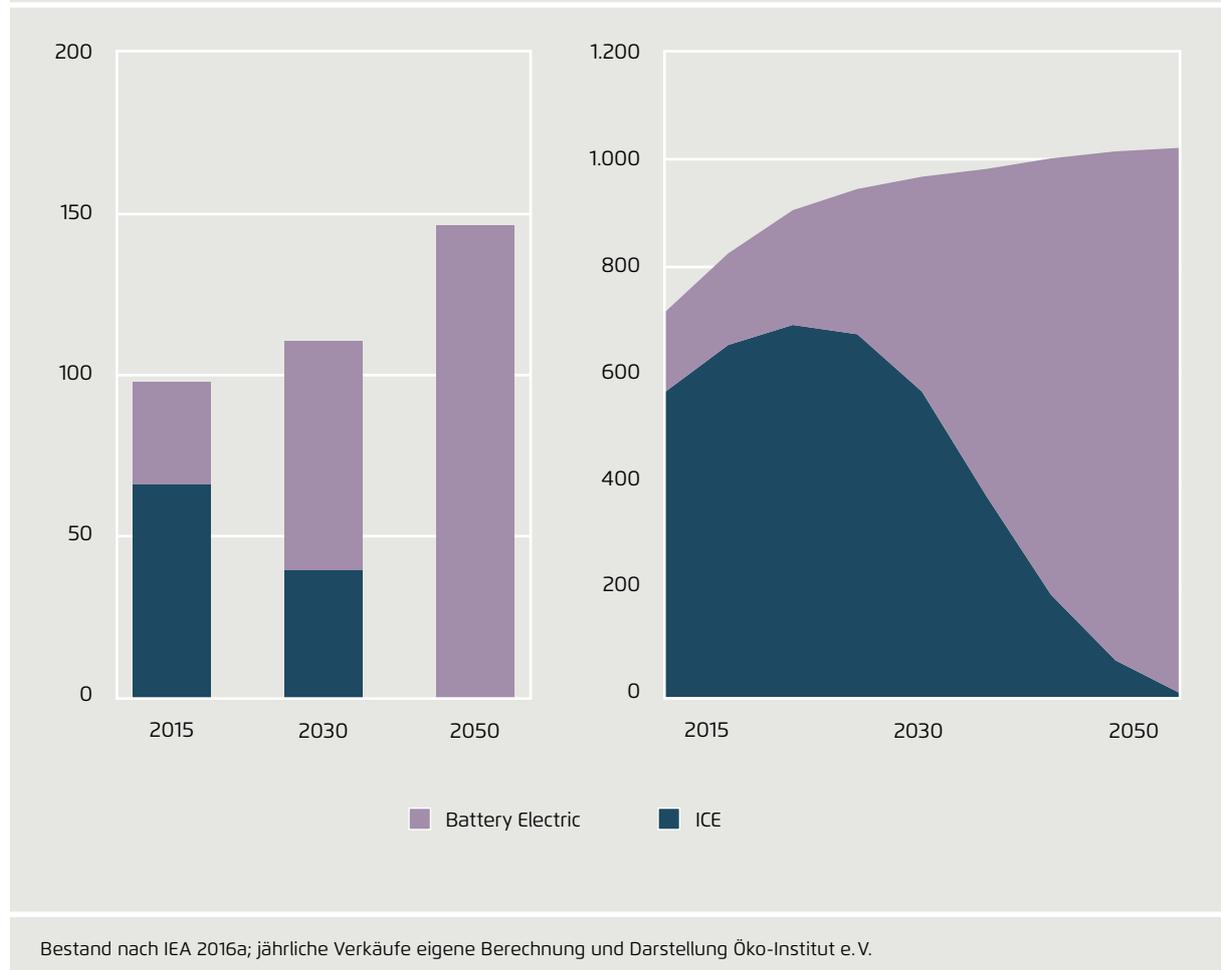
Infolge massiver Luftverschmutzung in den Metropolen Chinas wurde der Verkauf von konventionellen Zweirädern mit Verbrennungsmotor in vielen Großstädten verboten. Dementsprechend werden bereits heute vor allem in China und auch in Südostasien elektrisch angetriebene Motorroller verkauft. Daher ist im Basisjahr 2015 bereits ein relativ hoher Anteil elektrisch betriebener Krafträder zu verzeichnen (IEA 2016 b). Allerdings sind diese häufig mit Blei-Säure- und nicht mit Lithium-Ionen-Batterien ausgestattet. Es wird im Rahmen dieser Studie angenommen, dass in China der Anteil der Lithium-Ionen-Batterien von 4 Prozent im Jahr 2015 auf 50 Prozent im Jahr 2030 und 100 Prozent im Jahr 2050 steigt. Im Rest der Welt wird für den gesamten Betrachtungszeitraum eine Durchdringung mit Lithium-Ionen-Batterien unterstellt.

Etwa 30 Prozent der knapp 100 Millionen verkauften Krafträder im Jahr 2015 waren elektrisch. Im 2DS-Szenario steigen die Gesamtverkäufe im Jahr 2030 um etwa 14 Prozent auf knapp 115 Millionen Einheiten an, wobei konventionelle Verbrenner nur noch etwas mehr als ein Drittel ausmachen. Im Jahr 2050 geht das 2DS-Szenario von einer vollständigen Elektrifizierung des Kraftradsektors aus. Das spiegelt sich auch im Bestand wider, sodass global mehr als eine Milliarde elektrischer Krafträder im Bestand sind. Die Verkaufszahlen umfassen im 2DS-Szenario knapp 150 Millionen Einheiten (siehe Abbildung 2.6).

Im Vergleich zum 4DS-Szenario sind die Bestandszahlen im 2DS-Szenario etwas höher, insbesondere aufgrund der Verlagerung vom Pkw zum Kraftrad im urbanen Raum. Weiterhin wird im 4DS-Szenario bis 2050 am konventionellen Antrieb festgehalten, sodass deutlich mehr als die Hälfte der 105 Millionen verkauften Einheiten einen Verbrennungsmotor besitzen.

Jährliche Verkäufe (links) und Bestand (rechts) von Krafträdern nach dem 2DS-Szenario (Millionen Fahrzeuge)

Abbildung 2.6



Der Kraftradsektor ist der einzige der betrachteten Fahrzeugtypen (Pedelects ausgenommen), der nach dem 2DS-Szenario sowohl beim Bestand als auch bei Verkäufen im Jahr 2050 keine konventionellen Antriebe mehr zählt. Im Vergleich mit anderen Fahrzeugtypen ist die Entwicklung des Segments vor allem deshalb dynamischer, da die Lebensdauer mit circa sieben Jahren im Schnitt deutlich geringer angenommen wird als beispielsweise die eines Pkws mit zwölf Jahren. Allerdings spielt auch der geringere Anschaffungspreis eine wesentliche Rolle.

Pedelects

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, ist die statistische Erfassung von Zweirädern mit einigen Unsicherheiten behaftet. Da in der IEA-Studie die Zahlen für Pedelects nicht enthalten sind, wurde auch hier eine alternative Vorgehensweise angewendet. Aufgrund der Tatsache, dass Pedelects kein entsprechendes Pendant zum Verbrennungsmotor oder zum alternativen Antrieb besitzen, werden in den Szenarien hier nur batteriebetriebene Fahrzeuge berücksichtigt (siehe Abbildung 2.7).

Die projizierten Verkaufszahlen bis 2035 für das 2DS-Szenario stammen aus dem *Electric Bikes World-wide Report*⁶ und werden bis 2050 fortgeschrieben. (Jamerson, Benjamin 2015) Die Absatzmärkte für Pedelecs liegen im Basisjahr vor allem in Europa, Japan und Nordamerika. Insgesamt werden 2015 fast drei Millionen Pedelecs verkauft. Bis 2030 wachsen die Verkaufszahlen um 750 Prozent. Von 2030 auf 2050 verdoppeln sich die Zahlen nochmals und erreichen fast 40 Millionen Verkäufe. Im 4DS-Szenario geht man ebenfalls von einem starken Anstieg der Verkäufe aus, die allerdings etwa 30 Prozent unter dem Niveau des 2DS-Szenarios liegen.

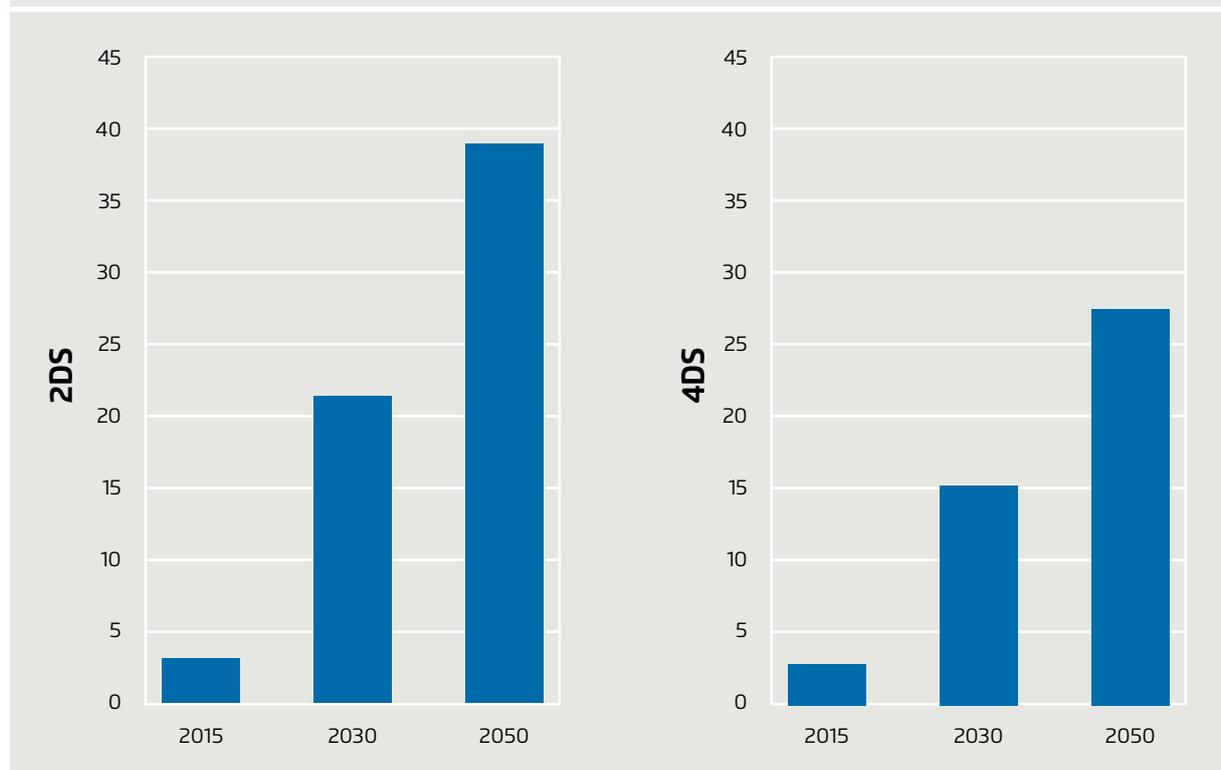
- 6 Die Studie zählt allerdings chinesische Scooter (Scooter Style Electric Bikes, SSEBs) in ihrer Statistik zu den Pedelecs hinzu. Für diese Arbeit wurden die chinesischen Scooter dementsprechend nicht berücksichtigt, da sie bereits in der Kategorie Krafträder beinhaltet sind.

Zusammenfassende Betrachtung

Vergleicht man die Relevanz der Elektromobilität im 2DS-Szenario über alle Fahrzeugtypen hinweg, stellt man fest, dass es deutliche Unterschiede in den Anteilen elektrisch betriebener Fahrzeuge gibt. So sind bereits im Basisjahr ein Drittel aller verkauften Busse elektrisch, während Lkw noch vollständig von Verbrennungsmotoren angetrieben werden. Betrachtet man die absolute Relevanz, sind weniger die Anteile der Elektromobilität innerhalb eines Typs von Bedeutung, sondern vielmehr die Gesamtverkaufszahlen. Trotz eines hohen Anteils elektrisch angetriebener Busse spielen sie beim Vergleich der Gesamtverkäufe elektrischer Fahrzeuge nur eine geringe Rolle. Die Einheiten verkaufter Elektrofahrzeuge werden im 2DS-Szenario in allen Betrachtungszeiträumen von Krafträdern dominiert. Der Anteil elektrischer Pkw nimmt am Gesamtvolumen verkaufter Elektrofahrzeuge stetig zu und erreicht mehr als ein

Jährliche Verkäufe von Pedelecs nach dem 2DS-Szenario (links) und dem 4DS-Szenario (rechts) (Millionen Fahrzeuge)

Abbildung 2.7



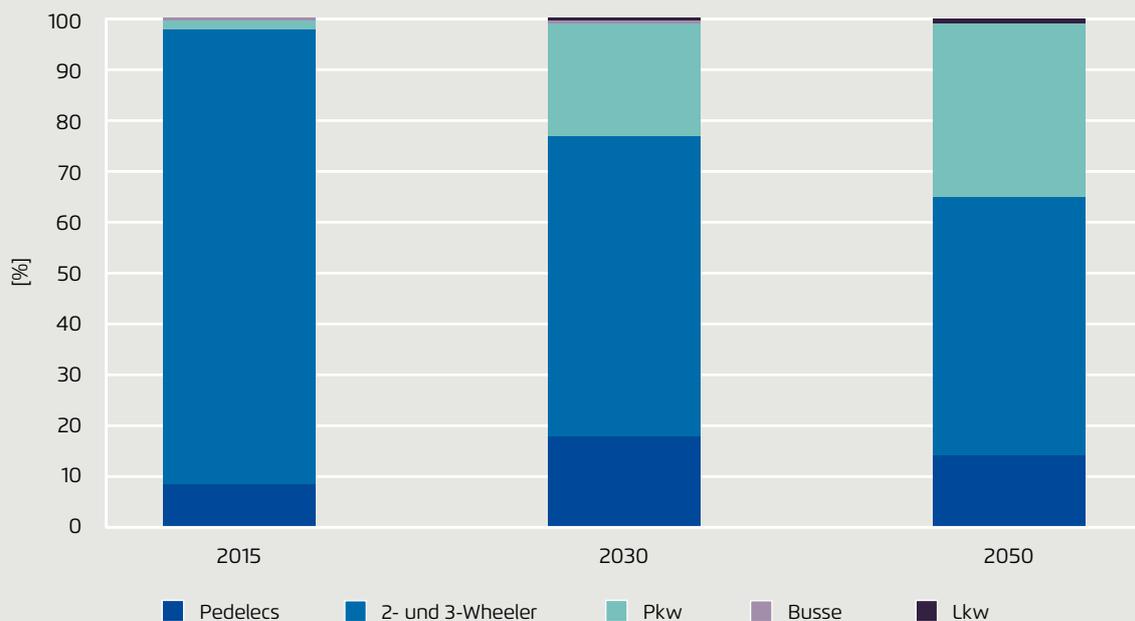
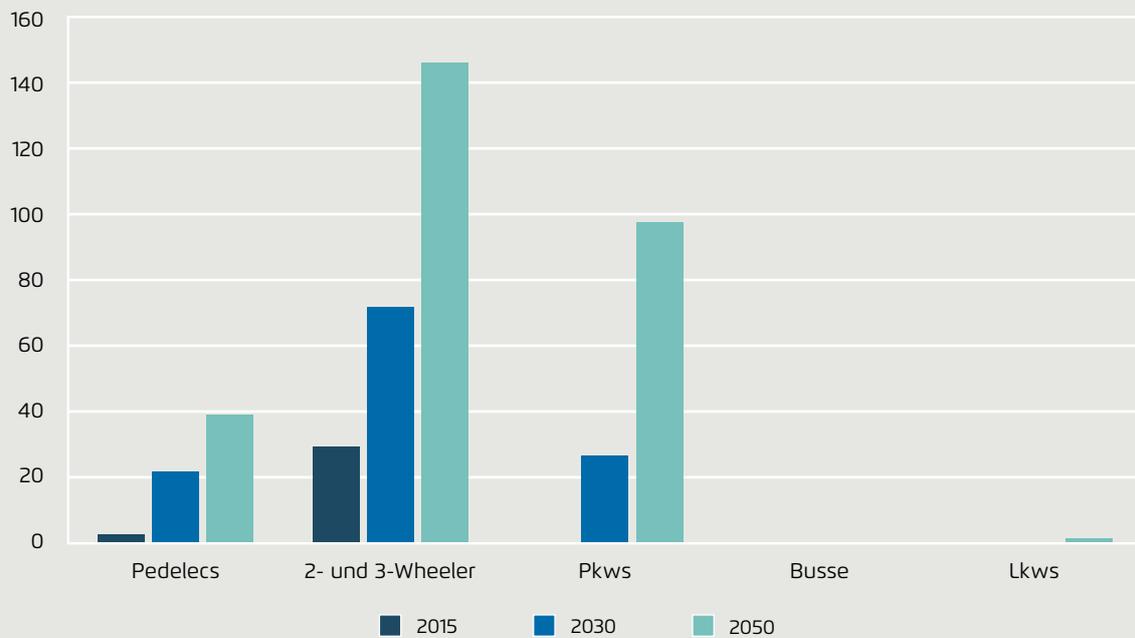
Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V. nach Jamerson, Benjamin 2015

Drittel im Jahr 2050 (siehe Abbildung 2.8). Pedelecs haben mit einem Anteil von über zehn Prozent im Jahr 2050 an allen Verkäufen elektrischer Fahrzeuge durchaus eine Relevanz, die allerdings zu relativieren ist, da die verbauten Batterien wesentlich kleiner sind als beispielsweise bei Pkw. Trotz größerem Rohstoffbedarf je Einheit bei Bussen und Lkw muss man davon ausgehen, dass die niedrigen Verkaufszahlen nur geringfügige Auswirkungen auf den Gesamtbedarf von Rohstoffen für die Elektromobilität generieren werden. Es wird deutlich, dass die meisten Verkäufe elektrischer Fahrzeuge durch Krafträder und Pkw generiert werden. Dementsprechend wird auch der Bedarf nach verschiedenen Rohstoffen für die Elektromobilität vorrangig von diesen Fahrzeugtypen bestimmt. Allerdings kann man davon ausgehen, dass der Rohstoffbedarf je Einheit bei Pkw, aufgrund von Leistung und Größe, deutlich höher ist (siehe Abschnitt 3).

Im nachfolgenden Kapitel wird der Bedarf der einzelnen Rohstoffe für die einzelnen Stützjahre auf Basis der vorgestellten Szenarien ermittelt.

Jährliche Verkäufe aller elektrischen Fahrzeuge (PHEV, BEV, FCEV) nach Typ, absolut (oben) und prozentual (unten) nach ZDS-Szenario

Abbildung 2.8



Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V. nach IEA 2016 a

03 | Globale Nachfrageentwicklung wichtiger Rohstoffe für Elektromobilität

In diesem Kapitel werden die Entwicklungen von fünf relevanten Rohstoffen in der Batterie- und Brennstoffzellentechnologie in der Elektromobilität skizziert. Ausgewählt wurde zum einen Platin als relevanter Rohstoff in der Brennstoffzellenkomponente. Der Platinbedarf für Katalysatoren der Verbrenner ist ebenfalls in die Szenarien eingegangen. Für die Lithium-Ionen-Batterien liegt der Fokus auf den Schlüsselrohstoffen Lithium, Kobalt, Graphit und Nickel.

Basis für die Hochrechnung des globalen Rohstoffbedarfs sind die in Kapitel 2 beschriebenen globalen Entwicklungen der Elektromobilität mit ihrer Aufteilung der jeweiligen Technologie. In die Nachfrageentwicklung der Rohstoffe für die Elektromobilität sind neben den Pkw auch Busse, Lkw, 2- und 3-Wheeler und Pedelecs eingegangen. Der Materialbedarf für die einzelnen Komponenten (Brennstoffzelle, LFP-, NMC-, NCA-Batterie) ist aus Fachquellen und persönlichen Interviews übernommen.⁷

3.1. Lithiumbedarf für die Elektromobilität

Lithium ist das zentrale Element für Lithium-Ionen-Batterien. In allen Typen von Lithium-Ionen-Batterien, die für die Elektromobilität eingesetzt werden⁸, ist Lithium enthalten. Optimierungen im Design der Batteriezellen, die eine erweiterte Reichweite ermöglichen werden, sind zu erwarten.

In Abbildung 3.1 ist der sehr stark steigende Bedarf an Lithium für die Elektromobilität zu erkennen. Der Gesamtbedarf für die E-Mobilität steigt im 2DS-Szenario (türkise Säulen) im Jahr 2030 auf knapp 160.000 Tonnen und im Jahr 2050 auf einen Jahresbedarf von knapp 500.000 Tonnen. Das 4DS-Szenario (dunkelgrüne Säulen) zeigt einen deutlich schwächeren Anstieg. Als Vergleich zum Lithiumbedarf in der Elektromobilität ist

in der gelben Säule die globale Primärförderung von Lithium im Jahr 2015 visualisiert. Die rohstoffspezifischen Reserven und Ressourcen für Lithium werden in Kapitel 4 ausführlicher behandelt.

Der Rohstoffbedarf aus Primärquellen kann durch den Einsatz von Sekundärmaterial gedämpft werden. Ein Lithiumrecycling findet heute in Europa noch nicht statt. Erste Recyclingvorstöße werden zum Beispiel in Südkorea gemeldet (Posco 2017). Als optimistische Annahme wird nach Rücksprachen mit Experten aus der Recyclingindustrie in beiden Szenarien eine deutliche Entwicklung der globalen Recyclingwirtschaft angenommen, sodass 2030 circa 10 Prozent des benötigten Lithiums durch Sekundärmaterial aus der Elektromobilität (Recycling von Lithium-Ionen-Batterien) gedeckt werden kann und 2050 circa 40 Prozent. Der Sekundärmaterialanteil ist als schraffierte Fläche in der Abbildung visualisiert. Um diese ambitionierten Recyclingziele zu erreichen, muss insbesondere das effiziente Einsammeln und Recyceln der Batterien gewährleistet sein. An dieser Stelle sei auf den gegenwärtigen Kreislauf für Blei-Säure-Batterien verwiesen. Blei aus Blei-Säure-Batterien weist eine der höchsten Rückgewinnungsquoten weltweit auf. Durch den Einsatz von Sekundärmaterial wird der Primärbedarf an Lithium im Jahr 2030 auf 148.000 Tonnen im 2DS-Szenario und auf 36.000 Tonnen im 4DS-Szenario gedämpft. 2050 liegt der Primärbedarf noch bei knapp 307.000 Tonnen im 2DS-Szenario und 70.000 Tonnen im 4DS-Szenario.

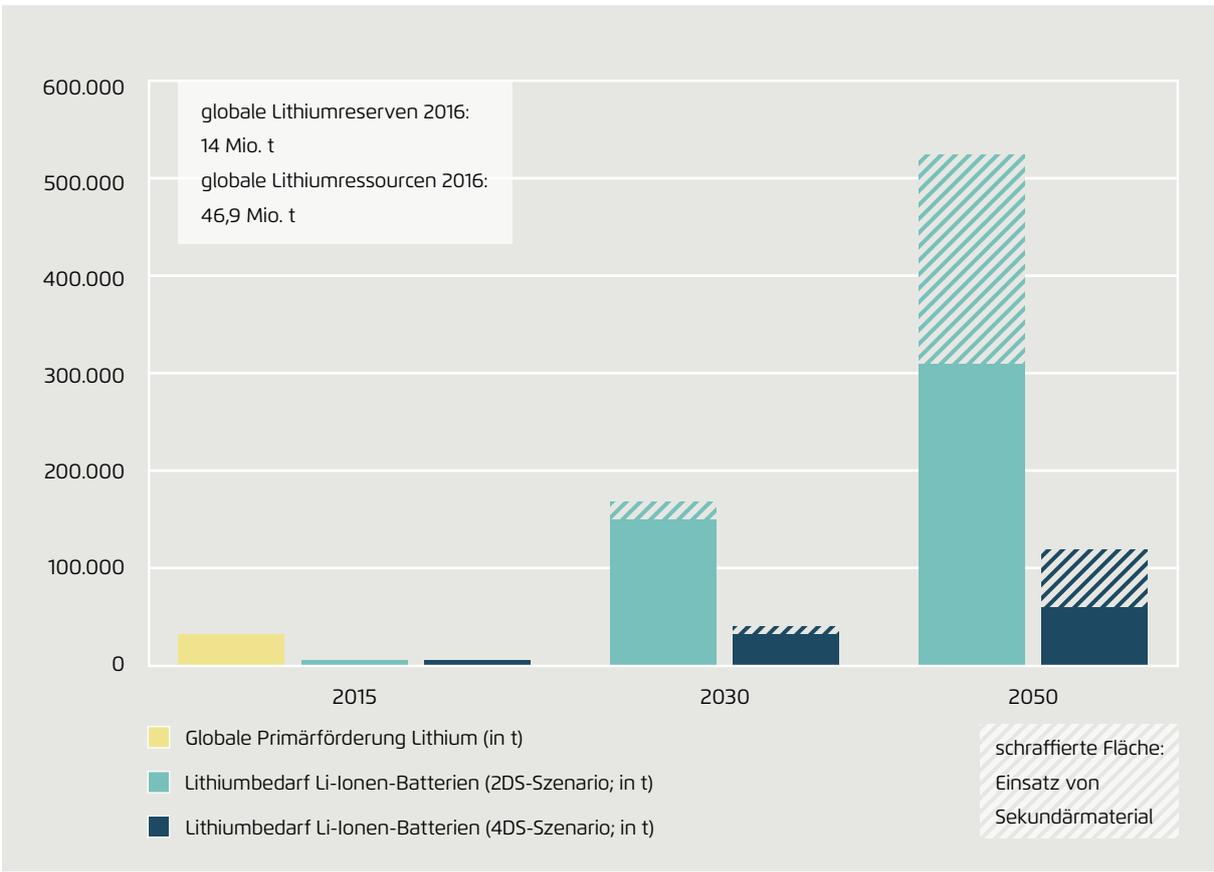
Haupttreiber des rasant steigenden Lithiumbedarfs ist der Pkw-Bereich. 2015 macht der Pkw-Bereich knapp 40 Prozent des Lithiumbedarfs für die Elektromobilität aus; ungefähr die gleiche Größenordnung weist der Bedarf im Bereich der Busse auf. Dies ist auf die Elektrifizierung der Busse in China zurückzuführen. In den Stützjahren 2030 und 2050 steigt die Elektrifizierung der Pkw stark an und somit haben die Pkw den größten Beitrag zum Lithiumbedarf in der Elektromobilität. Im 2DS-Szenario steigt der Anteil des Lithiumbedarfs der Pkw im Jahr 2030 auf 82 Prozent und 2050 auf 83 Prozent (siehe Abbildung 3.2). Im 4DS-Szenario liegt der Anteil des Lithiumbedarfs der Pkw 2030 bei 63 Prozent und 2050 bei 73 Prozent.

7 UBA 2016, Umicore 2017

8 NMC (Nickel-Mangan-Kobalt), NCA (Nickel-Kobalt-Aluminium), LFP (Lithium-Eisenphosphat) siehe auch Anhang 7.2.

Globaler Lithiumbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS und Sekundärmaterialpotenziale (in Tonnen)

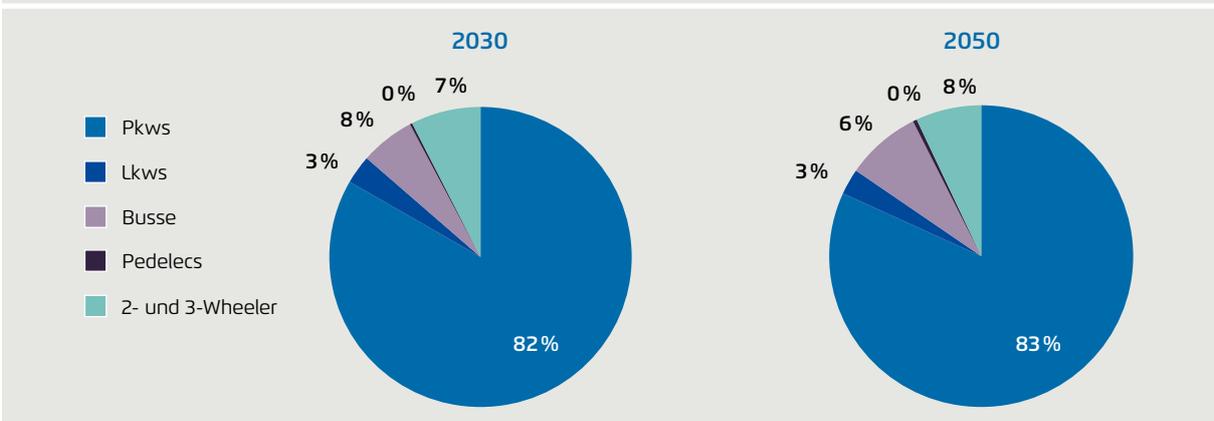
Abbildung 3.1



USGS 2017 für Primärförderung, Lithiumreserven und -ressourcen; eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V.

Lithiumbedarf in den Elektromobilitätsanwendungen im 2DS-Szenario in den Jahren 2030 und 2050

Abbildung 3.2



Eigene Berechnungen und Darstellung Öko-Institut e.V.

Die verschiedenen Anwendungen von Lithium auch in anderen Bereichen wie zum Beispiel Keramik und Glas oder andere Anwendungen von Lithium-Ionen-Batterien wie stationäre Stromspeicher werden im Anhang ausgewiesen. An dieser Stelle sei jedoch hervorgehoben, dass für Lithium mittel- und langfristig (2030/2050) die globale Elektromobilität eine dominante Rolle hinsichtlich der Nachfrageentwicklung einnehmen wird. Auch eine grobe Hochrechnung des Lithiumbedarfs über alle Anwendungen (inklusive der Elektromobilität wie oben beschrieben) wird im Anhang 7.1., Abbildung 7.2 dargestellt. Die zu erwartenden Wachstumsraten bei den anderen Lithiumanwendungen liegen jedoch deutlich niedriger im Vergleich zur Elektromobilität im 2DS-Szenario. In Kapitel 4 wird der ermittelte Rohstoffbedarf für Lithium mit den aktuell bekannten globalen Reserven und Ressourcen abgeglichen und die Verknappungsrisiken eingeordnet.

3.2. Kobaltbedarf für die Elektromobilität

Im Anwendungsgebiet Elektromobilität wird Kobalt in den Batterietypen Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) und Nickel-Kobalt-Aluminium (NCA) eingesetzt. Diese beiden Batterietypen kommen heute bereits zum Einsatz, außerdem werden auch kobaltfreie Lithium-Eisenphosphat-(LFP-)Batterien verwendet (siehe Anhang 7.2 Batteriekapazitäten). NMC- und NCA-Batterien weisen sehr hohe Energiedichten auf, sodass im Bereich der Lkw und Busse, aber auch im Pkw-Bereich, eine Abkehr von LFP-Batterien (die eine geringere Energiedichte aufweisen) hin zu NMC-Batterien angenommen wird. Dadurch steigt der Kobaltbedarf gegenüber heute stark an. Dies ist der Fall, selbst wenn durch Optimierungen in der Batterietechnologie ein geringerer Kobaltgehalt in der NMC-Batterie spätestens ab 2030 angenommen wird (Umicore 2017).

In Abbildung 3.3 ist der Kobaltbedarf in den beiden Szenarien illustriert. 2030 liegt der Kobaltbedarf im 2DS-Szenario (türkise Säule) bei circa 260.000 Tonnen und im 4DS-Szenario (dunkelgrüne Säule) bei knapp 60.000 Tonnen. 2050 steigt der Kobaltbedarf für die Elektromobilität noch einmal deutlich an auf etwas mehr als 800.000 Tonnen im 2DS-Szenario und 165.000 Tonnen im 4DS-Szenario. Die rohstoffspezifischen Reserven

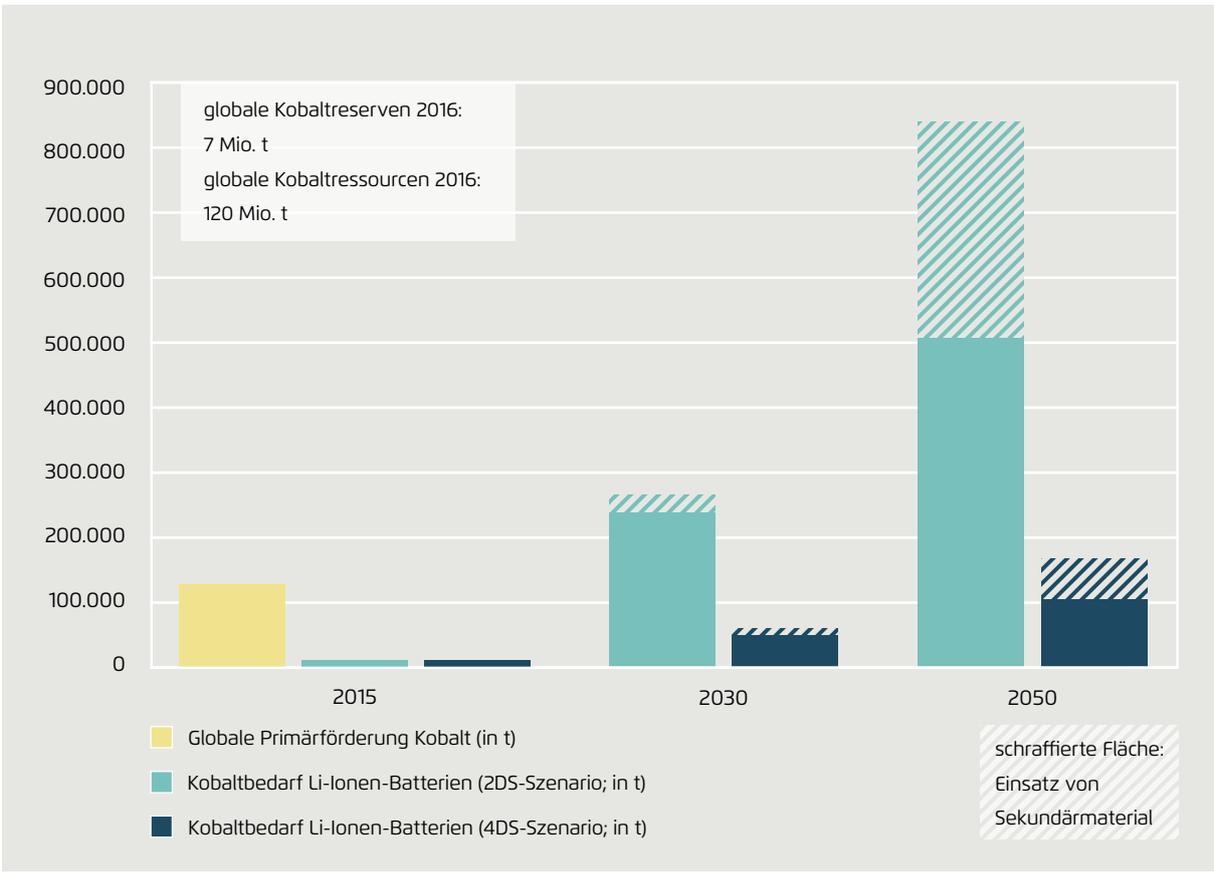
und Ressourcen für Kobalt werden in Kapitel 4 behandelt. Der Kobaltbedarf kann durch den Einsatz von Sekundärmaterial deutlich gesenkt werden. Kobalt wird heute schon gut recycelt (vor allem aus Katalysatoren, Superlegierungen, aber auch bereits aus Batterien). Der Einsatz von Sekundärmaterial liegt 2015 bei circa 35 Prozent bezogen auf alle Anwendungen. Für das 2DS- und 4DS-Szenario wird der Einsatz von Sekundärmaterial aus recycelten Lithium-Ionen-Fahrzeuggatterien im Jahr 2030 mit 10 Prozent und im Jahr 2050 mit 40 Prozent angenommen – eine global funktionierende Recyclingwirtschaft für Lithium-Ionen-Batterien vorausgesetzt. In der Abbildung ist der Anteil des Recyclingmaterials in der schraffierten Fläche illustriert.

Der größte Anteil des Kobaltbedarfs für die Elektromobilität ist auf den Pkw-Bereich zurückzuführen. 2015 liegt der Pkw-Anteil bei 97 Prozent. Der Wechsel der eingesetzten Batterietechnologie von LFP hin zu NMC und NCA führt zu einem leicht steigenden Anteil der Busse und Lkw. Die größte Nachfrage bleibt aber beim Pkw-Bereich mit einem Anteil von circa 80 Prozent im 2DS-Szenario in den Jahren 2030 und 2050, und 58 Prozent beziehungsweise 68 Prozent im 4DS-Szenario für die Jahre 2030 und 2050. Die Anteile im 2DS-Szenario sind für 2030 und 2050 in Abbildung 3.4 visualisiert.

Die verschiedenen Anwendungen von Kobalt auch in anderen Bereichen wie zum Beispiel Legierungen werden im Anhang ausgewiesen (siehe Anhang 7.1, Abbildung 7.3). Auch eine grobe Hochrechnung des Kobaltbedarfs über alle Anwendungen (inklusive der Elektromobilität wie oben beschrieben) wird dort dargestellt. An dieser Stelle sei jedoch hervorgehoben, dass für Kobalt mittel- und langfristig (2030/2050) die globale Elektromobilität eine dominante Rolle hinsichtlich der Nachfrageentwicklung einnehmen wird. Eine Einordnung des Kobaltbedarfs im Verhältnis zu den aktuell bekannten globalen Reserven und Ressourcen wird in Kapitel 4 vorgenommen.

Globaler Kobaltbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS und Sekundärmaterialpotenziale (in Tonnen)

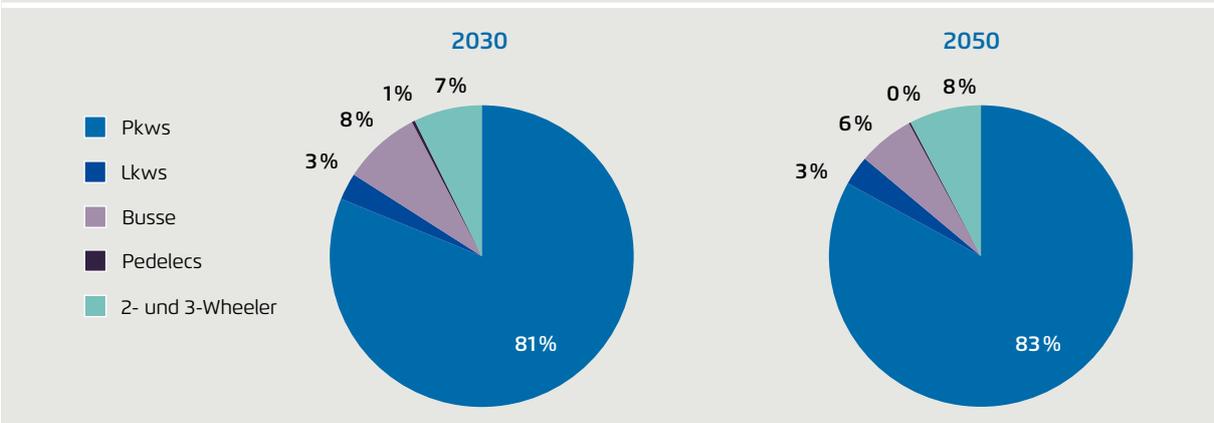
Abbildung 3.3



USGS 2017 für Primärförderung, Kobaltreserven und -ressourcen; eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V.

Kobaltbedarf in den Elektromobilitätsanwendungen im 2DS-Szenario in den Jahren 2030 und 2050

Abbildung 3.4



Eigene Berechnungen und Darstellung Öko-Institut e.V.

3.3. Nickelbedarf für die Elektromobilität

Durch Optimierung der Nickel-Mangan-Kobalt-(NMC-) Batteriezellen sinkt der relative Kobaltbedarf pro Batterie, im Gegenzug steigt allerdings der Nickelbedarf in diesen NMC-Batterien. Nickel wird – wie Kobalt – nicht in Lithium-Eisenphosphat-Batterien eingesetzt, findet aber Anwendung in den NMC- und Nickel-Kobalt-Aluminium-(NCA-)Batterien. Es wird ein Trend zu einer NMC-Batterie mit dem Verhältnis 6 : 2 : 2 angenommen (6 Anteile Nickel, 2 Anteile Mangan, 2 Anteile Kobalt, stöchiometrisches Verhältnis untereinander). Der angenommene Wechsel hin zu den Batterietypen mit den höchsten Energiedichten (NMC und NCA) führt zusätzlich zu einem steigenden Nickelbedarf in den Szenarien.

In Abbildung 3.5 ist der globale Nickelbedarf für die Elektromobilität in den Szenarien 2DS (türkise Säulen) und 4DS (dunkelgrüne Säulen) illustriert. Der Nickelbedarf für die Elektromobilität steigt 2030 im 2DS-Szenario auf circa 830.000 Tonnen und im 4DS-Szenario auf knapp 180.000 Tonnen. 2050 liegt der Nickelbedarf im 2DS-Szenario mit 2,6 Millionen Tonnen über der Primärproduktion 2015 (gelbe Säule). Im 4DS-Szenario steigt der Nickelbedarf 2050 auf circa 570.000 Tonnen. Die rohstoffspezifischen Reserven und Ressourcen für Nickel werden in Kapitel 4 näher behandelt.

Das Nickelrecycling ist bereits heute etabliert (auch in kleinerem Umfang aus Lithium-Ionen-Batterien). In Stahlanwendungen liegt das eingesetzte Sekundärnickel bei 25 bis 50 Prozent (UNEP 2011). Für den Anwendungsbereich der Batterien wird in den Szenarien von einem Sekundärmaterialanteil im 2DS- und 4DS-Szenario von 7 Prozent im Jahr 2030 und 40 Prozent im Jahr 2050 ausgegangen. Dabei stammt das Sekundärmaterial ausschließlich aus recycelten Batterien aus der Elektromobilität. Das eingesetzte Recyclingmaterial ist in der Abbildung als schraffierte Fläche dargestellt.

Der Nickelbedarf in der Elektromobilität wird vor allem getrieben durch den Pkw-Bereich. Ähnlich wie bei Kobalt liegt der Pkw-Anteil im Jahr 2015 bei über 90 Prozent, im 2DS-Szenario in den Jahren 2030 und 2050 über 80 Prozent und im 4DS-Szenario 2030 bei 60 Prozent und 2050 bei 72 Prozent. Die Anteile im 2DS-Szenario sind für 2030 und 2050 in Abbildung 3.6 visualisiert.

Die unterschiedlichen Anwendungen von Nickel (siehe Abbildung 7.5) auch in anderen Bereichen wie zum Beispiel Edelstahl werden im Anhang ausgewiesen. Auch eine grobe Hochrechnung des Nickelbedarfs (siehe Abbildung 7.6) über alle Anwendungen (inklusive der Elektromobilität wie oben beschrieben) wird im Anhang dargestellt. Die Hochrechnung des Nickelbedarfs für die Elektromobilität wie auch für die anderen Anwendungen wird in Kapitel 4 mit den aktuell bekannten globalen Reserven und Ressourcen eingeordnet.

3.4. Grafitbedarf für die Elektromobilität

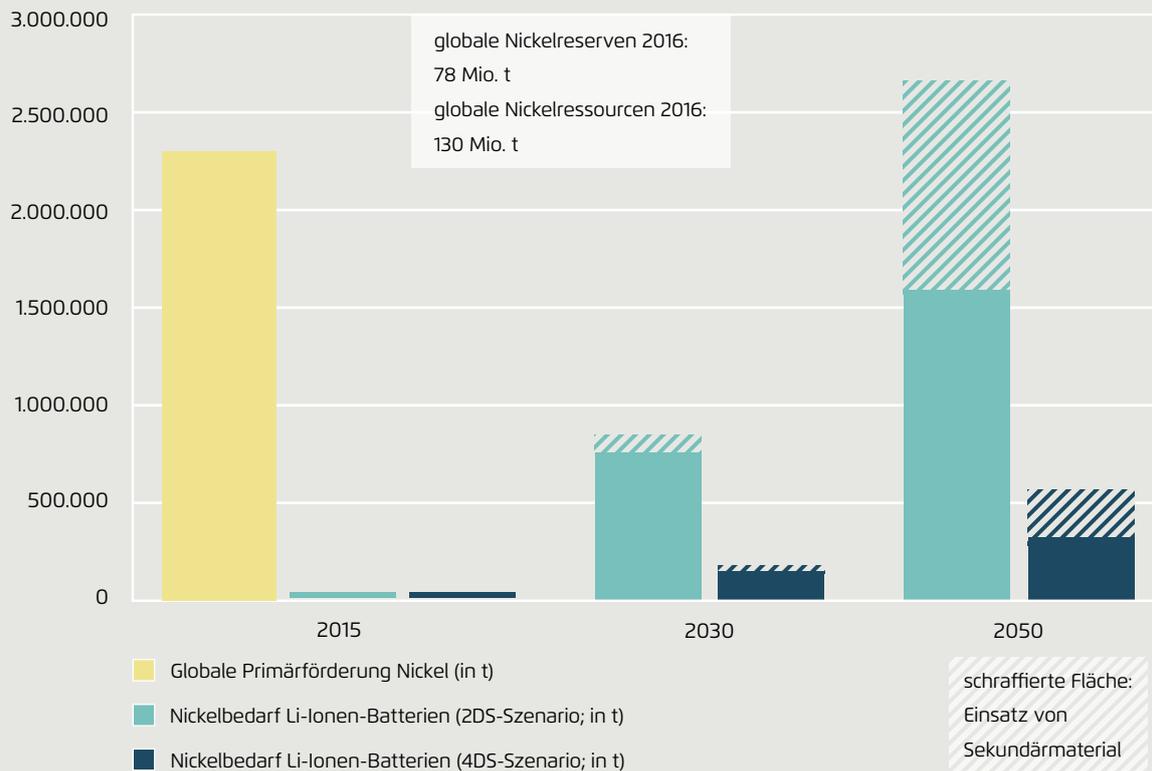
Grafit wird – wie Lithium – in allen Lithium-Ionen-Batterietypen eingesetzt, die in der Elektromobilität Anwendung finden. Der Grafitbedarf in Gramm je Kilowattstunde liegt bei allen Batterietypen (LFP, NMC, NCA) in einer ähnlichen Größenordnung. In Abbildung 3.7 ist der Grafitbedarf der Batteriekomponente in der Elektromobilität illustriert. Der Grafitbedarf steigt im 2DS-Szenario im Jahr 2030 stark an auf 1,6 Millionen Tonnen und im Jahr 2050 auf knapp über fünf Millionen Tonnen. Im 4DS-Szenario liegt der Grafitbedarf 2030 bei circa 400.000 Tonnen und 2050 bei 1,2 Millionen Tonnen.

In der gelben Säule ist die globale Primärförderung von natürlichem Grafit dargestellt. Eine Besonderheit von Grafit liegt darin, dass er mit synthetisch hergestelltem Grafit substituiert werden kann. Bereits heute wird synthetischer Grafit eingesetzt, da synthetisch hergestellter Grafit Qualitätsvorteile gegenüber natürlichem Grafit aufweist. Da der Bedarf daher nicht oder zumindest nicht allein von dem Primärrohstoff gedeckt werden muss, sind die Säulen des Grafitbedarfs in den Szenarien weiß gepunktet dargestellt. Externe Szenarien (zum Beispiel Pilot 2017) gehen davon aus, dass die Herstellung von synthetischem Grafit die Primärförderung von natürlichem Grafit übersteigt.

Ein Recycling von Grafit aus Batterien ist bisher nicht bekannt und daher nicht in die Szenarienberechnung eingegangen. Der Pkw-Bereich nimmt den Großteil des Grafitbedarfs in der Elektromobilität ein. Im 2DS-Szenario liegt der Pkw-Anteil 2030 und 2050 bei über 80 Prozent. Im 4DS-Szenario gehen 2030 64 Prozent und 2050 73 Prozent auf die Pkw zurück. Die Anteile im 2DS-Szenario sind für 2030 und 2050 in Abbildung 3.8 visualisiert.

Globaler Nickelbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS und Sekundärmaterialpotenziale (in Tonnen)

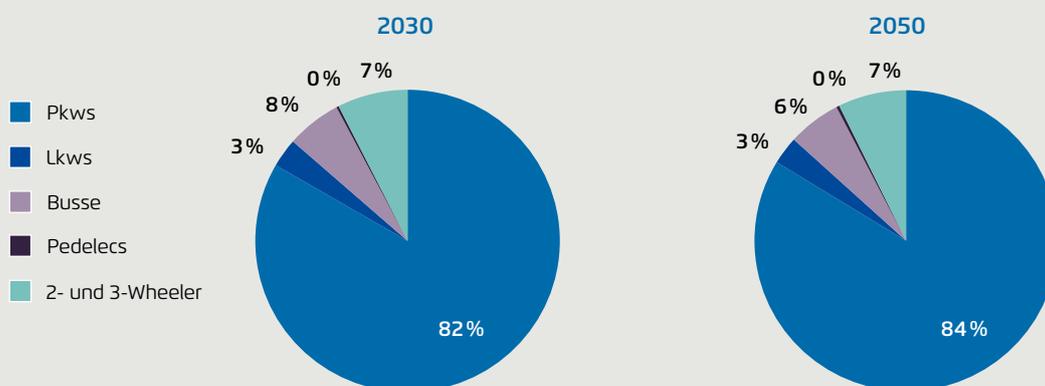
Abbildung 3.5



USGS 2017 für Primärförderung, Nickelreserven und -ressourcen; eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V.

Nickelbedarf in den Elektromobilitätsanwendungen im 2DS-Szenario in den Jahren 2030 und 2050

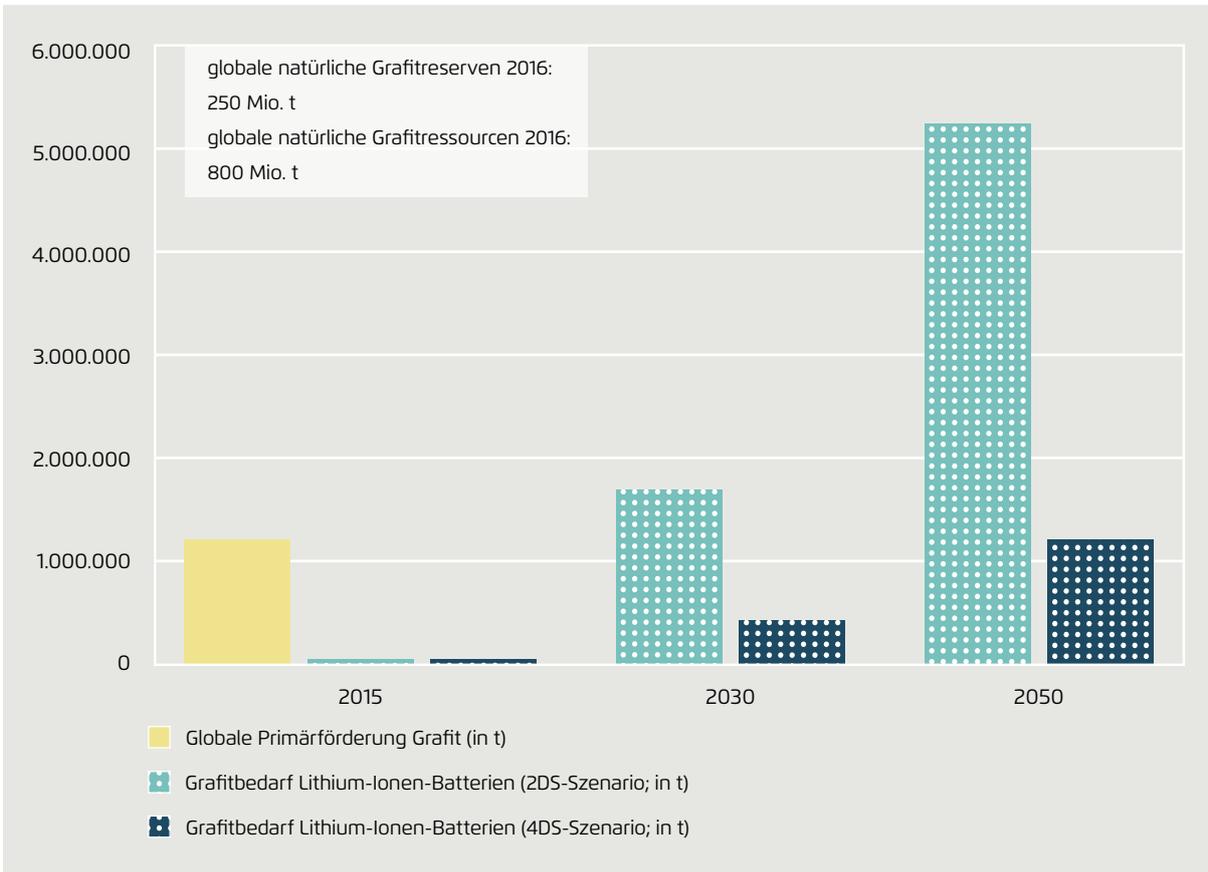
Abbildung 3.6



Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V.

Globaler Grafitbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge
2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS (in Tonnen)

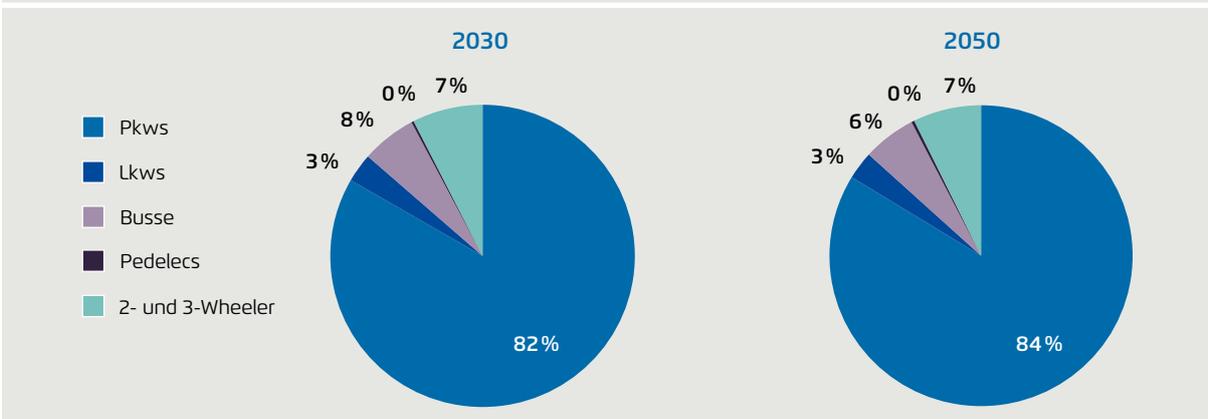
Abbildung 3.7



USGS 2017 für Primärförderung, Grafitreserven und -ressourcen; eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V.

Grafitbedarf in den Elektromobilitätsanwendungen
im 2DS-Szenario in 2030 und 2050

Abbildung 3.8



Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V.

Die unterschiedlichen Anwendungen von natürlichem Grafit auch in anderen Bereichen wie zum Beispiel Stahl werden im Anhang ausgewiesen. Auch eine grobe Hochrechnung des Grafitbedarfs über alle Anwendungen (inklusive der Elektromobilität wie oben beschrieben) wird im Anhang dargestellt. Eine Einordnung des Grafitbedarfs und mögliche Verknappungen unter Abgleich der aktuell bekannten globalen Reserven und Ressourcen wird in Kapitel 4 vorgenommen.

3.5. Platinbedarf für die Elektromobilität (inklusive Autoabgaskatalysatoren)

Platin wird in der Komponente Brennstoffzelle der Brennstoffzellenfahrzeuge eingesetzt. Des Weiteren wird bei den Szenarien der Platinbedarf in den Katalysatoren von Fahrzeugen mit konventionellem Verbrennungsmotor⁹ betrachtet. Der durchschnittliche Bedarf liegt bei 1,1 Gramm Platin¹⁰ je Katalysator in einem Pkw (Verbrenner). In Abbildung 3.9 wird der Platinbedarf im 2DS- und 4DS-Szenario illustriert. Die grünen Säulen zeigen den Platinbedarf im 2DS-Szenario, die blauen Säulen das 4DS-Szenario. Die Säulen sind nochmal unterteilt. Die dunklere Vollfarbe stellt jeweils den Bedarf der Elektrofahrzeuge (Platinbedarf der Brennstoffzelle) dar. Der jeweilige hellere schraffierte obere Teil der Säulen illustriert den Platinbedarf der Katalysatoren in den ICE-Fahrzeugen. 2015 ist bereits ein deutlicher Platinbedarf durch die Katalysatoren der Verbrenner zu erkennen (knapp 70 Tonnen).

2030 liegt der Platinbedarf im 2DS-Szenario für die Brennstoffzellenfahrzeuge und die Katalysatoren bei circa 110 Tonnen. Dabei entfallen circa 80 Prozent auf die Katalysatoren der ICE-Fahrzeuge. Im 4DS-Szenario liegt der Platinbedarf bei etwa 150 Tonnen, wovon über 95 Prozent auf die Katalysatoren der Verbrenner zurückzuführen sind. 2050 steigt der Platinbedarf in beiden Szenarien an. Während im 2DS-Szenario der Platinbe-

darf zu 100 Prozent auf die Brennstoffzellenfahrzeuge zurückzuführen ist, liegt der Platinbedarf im 4DS-Szenario bei knapp 90 Prozent bei den ICE-Fahrzeugen.

Die Anteile des Platinbedarfs in den verschiedenen Elektromobilitätsbereichen unter Berücksichtigung des Platinbedarfs in ICE-Katalysatoren im 2DS-Szenario sind für 2030 und 2050 in Abbildung 3.10 visualisiert.

Platin wird bereits heute sehr gut recycelt. Nach (BGR 2016) wird der weltweite Platinbedarf zu 23 Prozent aus Sekundärmaterial gedeckt. Die End-of-Life-Recyclingrate liegt bei Platin im Fahrzeugbereich bei über 50 Prozent (UNEP 2011). Durch den Einsatz von Recyclingmaterial, welches aus dem Mobilitätssektor stammt, wird der Bedarf an Primärmaterial deutlich gedämpft. 2030 liegt der Einsatz von Sekundärmaterial in beiden Szenarien bei 50 Prozent und 2050 bei 60 Prozent. Die deutliche Dämpfung des Primärmaterialbedarfs ist in Abbildung 3.11 illustriert. Der Sekundärmaterialanteil wird in folgender Abbildung (Abbildung 3.11) durch die schraffierte Fläche visualisiert.

In dieser Studie wird nur der Platinbedarf in den Brennstoffzellen und Katalysatoren betrachtet. Der Bedarf der anderen Platingruppenmetalle für die Katalysatoren (wie zum Beispiel Palladium) ist nicht einbezogen.

Die unterschiedlichen Anwendungen von Platin auch in anderen Bereichen wie zum Beispiel der Schmuckindustrie werden im Anhang ausgewiesen. Auch eine grobe Hochrechnung des Platinbedarfs über alle Anwendungen (inklusive der Elektromobilität wie oben beschrieben) wird im Anhang dargestellt.

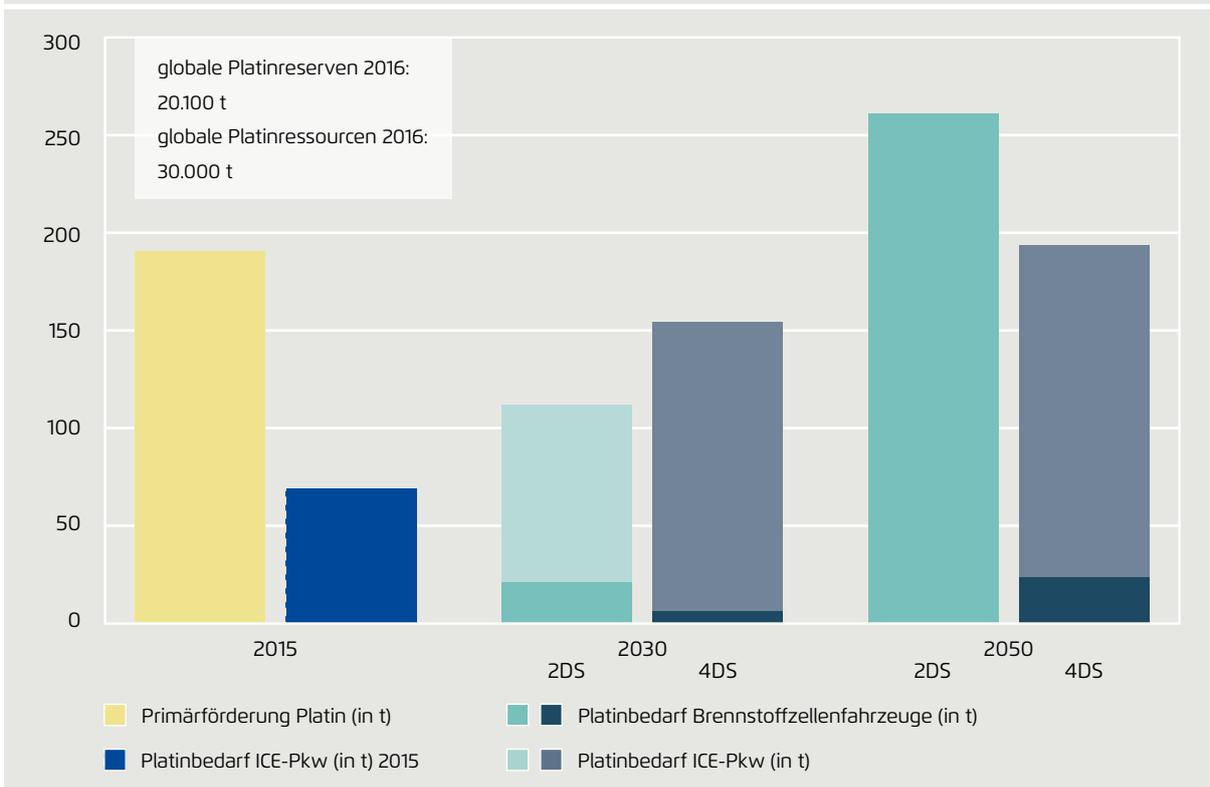
Eine Einordnung der globalen Hochrechnungen des Platinbedarfs für die Elektromobilität und weiteren Anwendungen hinsichtlich möglicher Verknappungen wird in Kapitel 4 im Abgleich mit den aktuell bekannten globalen Reserven und Ressourcen vorgenommen.

9 In den Katalysatoren der HEV und PHEV sind andere Platingruppenmetalle (zum Beispiel Palladium) enthalten.

10 Zusätzlich werden in Autoabgaskatalysatoren für Pkws noch rund 2,9 Gramm Palladium/Rhodium eingesetzt (SubSKrit 2018).

Globaler Platinbedarf in Brennstoffzellen und Autoabgaskatalysatoren für Fahrzeuge
2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS (in Tonnen);
(ohne Berücksichtigung von Sekundärmaterial)

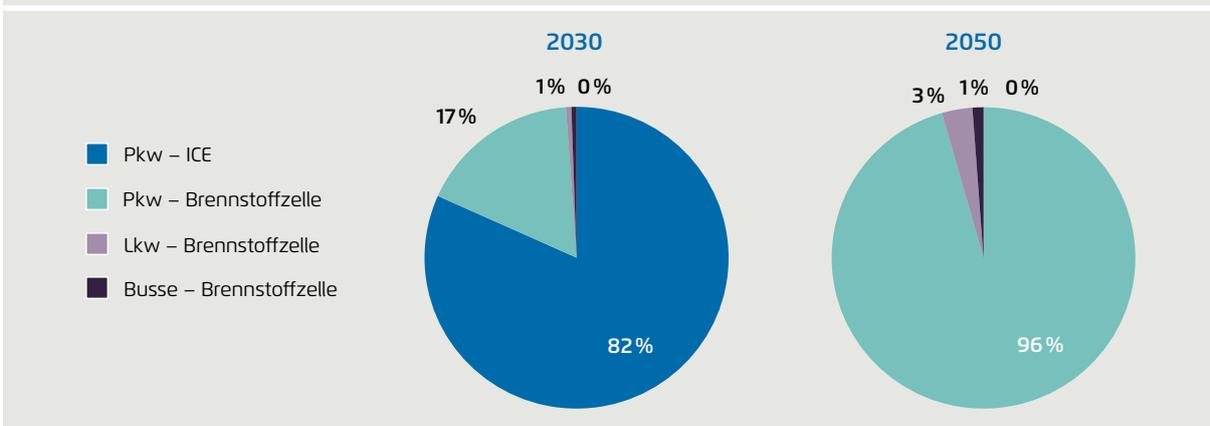
Abbildung 3.9



Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V.; USGS 2017 für Primärförderung
Platinreserven und -ressourcen: Abschätzung Öko-Institut nach USGS 2017 (Annahme: mindestens 30% Platinanteil an den globalen Reserven und Ressourcen der Platingruppenmetalle)

Platinbedarf in den Elektromobilitätsanwendungen
im 2DS-Szenario in den Jahren 2030 und 2050

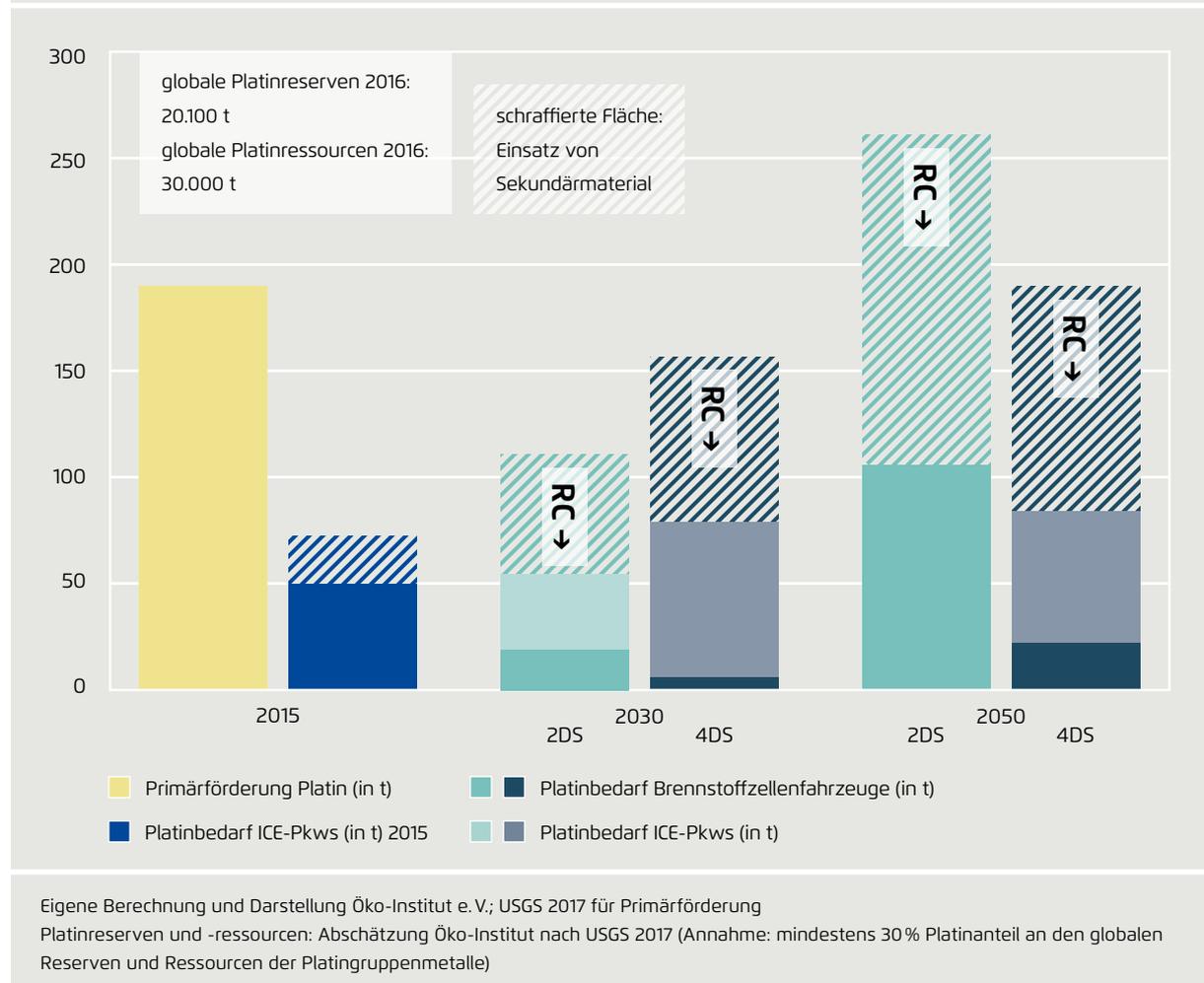
Abbildung 3.10



Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V.

Globaler Platinbedarf in Brennstoffzellen und Autoabgaskatalysatoren für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS (in Tonnen); (mit Annahmen von Sekundärmaterialeinsatz)

Abbildung 3.11



Der globale Bedarf der relevanten Rohstoffe für die Elektromobilität wird stark ansteigen. Dies gilt im Vergleich zur globalen Primärförderung 2015 vor allem für Lithium und Kobalt. Ebenso kann davon ausgegangen werden, dass die Rohstoffe auch in den anderen Anwendungsfeldern vermehrt nachgefragt werden; allerdings mit schwächeren Wachstumsraten. Hochrechnungen hierzu sind im Anhang ausgewiesen. An dieser Stelle sei hervorgehoben, dass für Lithium und Kobalt mittel- und langfristig (2030/2050) die globale Elektromobilität eine dominante Rolle hinsichtlich der Nachfrageentwicklung einnehmen wird.

3.6. Exkurs Seltene Erden

Elektromotoren für Hybrid-Pkw (HEV), Plug-in-Hybride (PHEV), vollelektrische Pkw (BEV) sowie Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) sind aufgrund ihres geringen Gewichts und Volumens sowie ihrer Energieeffizienz überwiegend permanent erregte Synchronmotoren mit Neodym-Eisen-Bor-Magneten (Buchert et al. 2011, Schüler, Schleicher, et al. 2016). Die Neodym-Eisen-Bor-Magnete enthalten Seltene Erden wie Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium (zusammen rund 30 Gewichtsprozent des Magnetmaterials). Vor einigen Jahren stiegen die Preise für Seltenerdmetalle beziehungsweise ihre Verbindungen – nicht zuletzt aufgrund eines weit über 90 Prozent liegenden Anteils der Volksrepublik China an der globalen Bergbauförderung und -verarbeitung – in wenigen Monaten zum Teil um das Zehn- bis Fünfzehnfache an (vgl. Schüler et al. 2011).

Vor dem Hintergrund dieser Erfahrungen wurden in den letzten sieben Jahren vonseiten der Magnethersteller, der Elektromotorenhersteller sowie der Automobilindustrie zahlreiche Innovationen angestoßen, um eine mögliche oder tatsächliche Gefährdung der Wertschöpfungskette Elektromotor durch Verknappung des Angebots an Seltenen Erden auszuschließen oder zumindest zu reduzieren (Schüler, Schleicher, et al. 2016; Degreif et al. 2017). Vor allem bei den Elektromotoren für vollelektrische Pkw existieren bereits sehr unterschiedliche Motorkonzepte, die gänzlich ohne Seltene Erden auskommen. Alternativen wie Asynchronmotoren (ASM) und der *Electrically/Externally-excited*-Synchronmotor (EESM) sind in einzelnen BEV-Modellen bereits schon auf dem Markt. Vor allem für Hybridfahrzeuge wird ein Umstieg auf Alternativen zu permanent erregten Synchronmotoren mit Neodym-Eisen-Bor-Magneten am schwierigsten eingeschätzt, da hier die Gewichts- und Volumenvorteile dieses Motorentyps besonders zum Tragen kommen. Allerdings gibt es neuerdings Teillösungen wie Elektromotoren mit Neodym-Eisen-Bor-Magneten, die ohne den Einsatz der schweren Seltenen Erden Dysprosium und Terbium (in vielen natürlichen Lagerstätten für Seltene Erden nicht relevant enthalten und daher tendenziell kritischer hinsichtlich Preise und Versorgung) auskommen (Green Car Congress 2016).

Ungeachtet dessen sind permanent erregte Synchronmotoren mit Neodym-Eisen-Bor-Magneten für die Elektromobilität zurzeit die erste Wahl aufgrund einer Reihe technologischer Vorzüge und deutlich gefallener Preise für Seltene Erden in den letzten Jahren seit dem Altzeitpeak 2010/11. Die kurz umrissenen alternativen Motorenentwicklungen zeigen jedoch deutlich, dass im Falle relevanter Beeinträchtigungen der Versorgungskette mit den genannten Seltenen Erden überzeugende und zum Teil ausgereifte und im Markt erprobte Alternativen relativ schnell zur Verfügung stünden.

04 | Potenzielle Herausforderungen: Fiktive oder reale Flaschenhälse?

Nachfolgend werden weitere eingangs formulierte zentrale Fragestellungen behandelt. Diese beziehen sich auf mögliche Herausforderungen bezüglich einer Rohstoffverknappung und auf die Auswirkungen potenzieller Preissteigerungen. Ebenso sind soziale und ökologische Risiken der Rohstoffförderung zentrale Fragestellungen.

4.1. Sind physische Limitierungen/ Verknappungen von Rohstoffen für die Elektromobilität ein reales Szenario?

Im Zusammenhang mit der Entwicklung der Elektromobilität wird von unterschiedlichen Akteuren häufig diese Kernfrage gestellt. Unter physischer Verknappung ist zu verstehen, dass ein Rohstoff geologisch nicht mehr ausreichend zur Verfügung steht und damit die Primärförderung die globale Nachfrage nicht mehr befriedigen kann. Die Frage nach temporärer Verknappung wird in Kapitel 4.2. adressiert.

In den vorangegangenen Kapiteln wurde dargelegt, dass eine global sehr dynamische Entwicklung der Elektromobilität entsprechend des Zwei-Grad-Ziel-Szenarios der IEA für zentrale Rohstoffe wie Lithium einen erheblichen Nachfrageanstieg bis zum Jahr 2050 mit sich führen wird. Da dieser Nachfrageanstieg nur teilweise durch Recycling abgedeckt werden kann, muss von einer erheblich steigenden jährlichen Primärproduktion ausgegangen werden. Nachfolgend wird für die untersuchten Rohstoffe Lithium, Kobalt, Nickel, Grafit und Platin die voranstellte Frage beantwortet und am Ende des Kapitels gibt eine Zusammenfassung eine vergleichende Einschätzung.

Lithium

Der Primärlithiumbedarf für die Elektromobilität liegt im 2DS-Szenario bei 148.000 Tonnen in 2030 und bei 307.000 Tonnen in 2050¹¹. Im Jahre 2016 wurde die

11 Gesamtbedarf wird aus Primärbedarf und Sekundärbedarf (Recycling) gedeckt.

globale Minenproduktion für Lithium durch die drei Länder Australien, Argentinien und Chile dominiert (siehe Abbildung 4.1). Insgesamt betrug die globale Minenproduktion im Jahr 2016 35.000 Tonnen (USGS 2017)¹². Hinzu kommt noch die Produktion in den USA.¹³

Eine wichtige Größe zur Einschätzung von etwaigen physischen Verknappungen sind unter anderem die globalen Reserven¹⁴. Diese betragen für Lithium nach (USGS 2017) im Jahr 2016 14 Millionen Tonnen, davon allein 7,5 Millionen Tonnen in Chile. Die Verteilung der aktuell 14 Millionen Tonnen Reserven für Lithium sind in der Abbildung 4.2 aufgeführt.

Interessant ist ein Vergleich mit den USGS-Daten für das Jahr 2006 für Lithium. Damals wurden für die globalen Lithiumreserven lediglich 4,1 Millionen Tonnen ausgewiesen (USGS 2007). Der Zehnjahresvergleich der Daten zeigt das erheblich gestiegene Interesse für den Rohstoff Lithium und die damit zusammenhängenden zunehmenden Explorationsaktivitäten.

Das Vorkommen an Lithium in der Erdkruste ist allerdings noch größer als die aktuell ausgewiesenen 14 Millionen Tonnen Reserven. Die USGS (USGS 2017) schätzt aktuell die bekannten globalen Ressourcen¹⁵ an Lithium auf 46,9 Millionen Tonnen (davon je 9 Millionen Tonnen

12 Die Daten und alle weiteren Daten für Lithium beziehen sich ausnahmslos auf Tonnen reiner Lithiumgehalt, unabhängig von der Tatsache, dass Lithium meist in Lithiumverbindungen vorliegt und gehandelt wird.

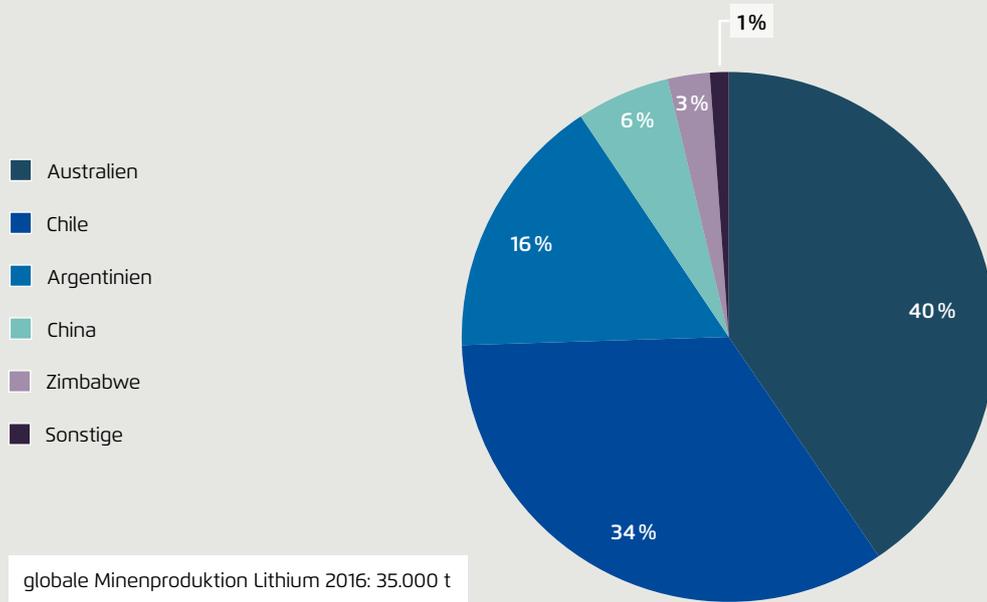
13 Nach eigenen Schätzungen des Öko-Instituts dürfte dies für 2016 nur eine niedrige vierstellige Größe sein.

14 Reserven (engl. reserves): der Teil der Ressourcen (engl. resources), die zur Zeit der Erhebung wirtschaftlich abgebaut werden könnten (USGS). Die Daten zu den Reserven können sich von Jahr zu Jahr ändern – so zum Beispiel bei steigenden Rohstoffpreisen, die dazu führen, dass ein größerer Anteil der Ressourcen wirtschaftlich gewonnen werden kann.

15 Ressource (engl. resource): der Teil des natürlichen Vorkommens (fest, flüssig oder gasförmig) eines Rohstoffs in der Erdkruste, der heute oder potenziell zukünftig abgebaut werden könnte (USGS).

Globale Minenproduktion Lithium 2016 (in Prozent der Förderländer)

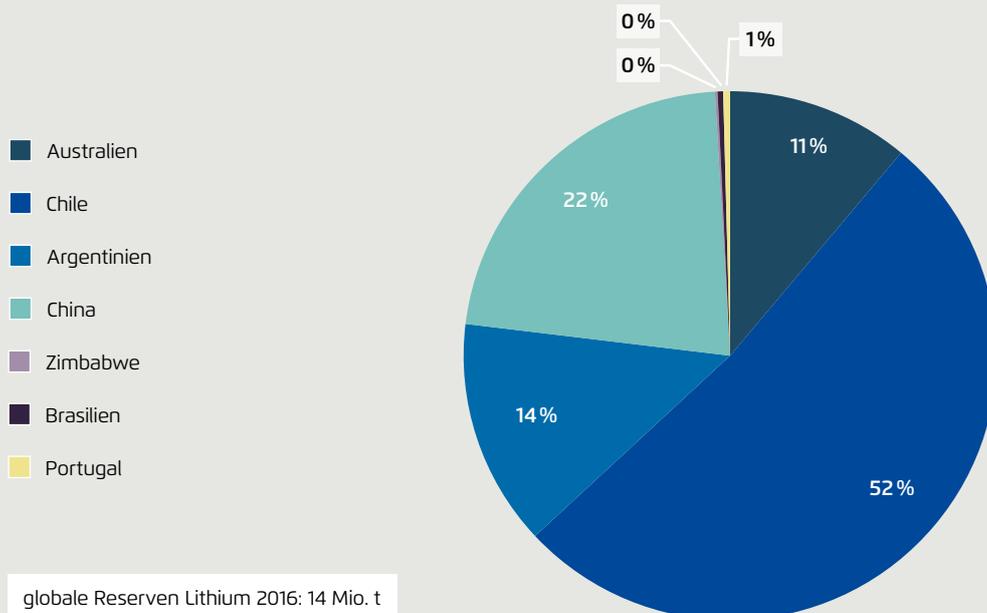
Abbildung 4.1



USGS 2017, ohne Produktion USA

Globale Reserven Lithium 2016 (nach Staaten in Prozent)

Abbildung 4.2



USGS 2017, ohne Reserven USA

in Argentinien und Bolivien, in Chile mehr als 7,5 Millionen Tonnen, in China 7 Millionen Tonnen, in den USA 6,9 Millionen Tonnen).

Aus den vorliegenden Daten lässt sich der Schluss ziehen, dass für Lithium trotz der beeindruckenden Wachstumsraten auf der Nachfrageseite auch auf lange Sicht (2050) keine physische Verknappung zu erwarten ist, die bedeuten würde, dass die natürlichen Vorkommen erschöpft sind. Auch unter Berücksichtigung der anderen Anwendungen (siehe Anhang 7.1., Abbildung 7.1) sind physische Verknappungen bis 2050 nicht zu erwarten.

Kobalt

Der Primärkobaltbedarf für die Elektromobilität liegt im 2DS-Szenario bei 238.000 Tonnen in 2030 und 501.000 Tonnen in 2050¹⁶. Die globale Minenproduktion für Kobalt wurde für 2016 mit 123.000 Tonnen angegeben, davon 66.000 Tonnen aus der Demokratischen Republik Kongo (DRC) (siehe Abbildung 4.3). Wie aus der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen ist, verteilt sich die übrige Minenproduktion auf vergleichsweise viele Staaten.

In der Abbildung 4.4 ist die Verteilung der globalen Kobaltreserven (insgesamt sieben Millionen Tonnen) zum Stand 2016 aufgeführt (USGS 2017). Augenfällig ist, dass die DRC auch bei den Reserven mit 49 Prozent in ähnlicher Größenordnung wie bei der aktuellen Minenproduktion (54 Prozent) an erster Stelle zu nennen ist. An zweiter Stelle folgt Australien mit 14 Prozent Anteil der aktuell bestimmten Kobaltreserven. Für die globalen Kobaltressourcen gibt (USGS 2017) an Land rund 25 Millionen Tonnen an, ganz überwiegend mit kupfer-, nickel- beziehungsweise kupfernichelhaltigen Erzen vergesellschaftet. Natürliche Vorkommen mit Kobalt als Hauptmetall im Erzvorkommen sind eher selten. So werden derzeit lediglich zwei Prozent der globalen Kobaltförderung aus entsprechenden Vorkommen gewonnen (Al Barazi et al. 2017). Zusätzlich werden auf dem Grund der Ozeane in Form von Manganknollen usw. derzeit mehr als 120 Millionen Tonnen an Kobaltressourcen geschätzt. Ungeachtet der deutlich wachsenden Kobaltnachfrage bis 2050, die vornehmlich

durch die Elektromobilität verursacht wird, sind für Kobalt keine physischen Verknappungen zu erwarten.

Nickel

Der Primärnickelbedarf für die Elektromobilität liegt im 2DS-Szenario bei 773.000 Tonnen in 2030 und 1.576.000 Tonnen in 2050¹⁷. Die Minenproduktion für Nickel betrug im Jahr 2016 rund 2,25 Millionen Tonnen (USGS 2017) (siehe Abbildung 4.5).

Die globalen Nickelreserven belaufen sich nach (USGS 2017) auf 78 Millionen Tonnen, davon liegen rund 24 Prozent in Australien, 13 Prozent in Brasilien und rund 10 Prozent in Russland. Die restlichen Reserven für Nickel verteilen sich auf eine ganze Reihe von Staaten (siehe Abbildung 4.6).

Die globalen Ressourcen an Nickel werden nach (USGS 2017) mit mindestens 130 Millionen Tonnen angegeben. Eine physische Verknappung ist für Nickel – auch unter Berücksichtigung der anderen Anwendungen – nicht zu erwarten.

Grafit

Der Grafitbedarf für die Elektromobilität liegt im 2DS-Szenario bei 1.657.000 Tonnen in 2030 und 5.105.000 Tonnen in 2050.¹⁸ Die Minenproduktion von natürlichem Grafit betrug 2016 1,2 Millionen Tonnen, dazu steuerte die Volksrepublik China allein 66 Prozent bei (USGS 2017). Nur ein geringer Anteil der Minenförderung an Grafit wurde 2016 für Lithium-Ionen-Batterien im Bereich der Elektromobilität benötigt. Die globalen Reserven an natürlichem Grafit betragen 250 Millionen Tonnen (davon 36 Prozent in der Türkei, 29 Prozent in Brasilien, 22 Prozent in China) und die globalen Ressourcen 800 Millionen Tonnen (USGS 2017). Da der wachsende Bedarf an Grafit für die Elektromobilität nicht zuletzt durch Synthesegrafit befriedigt werden kann, kann eine physische Verknappung auch langfristig ausgeschlossen werden.

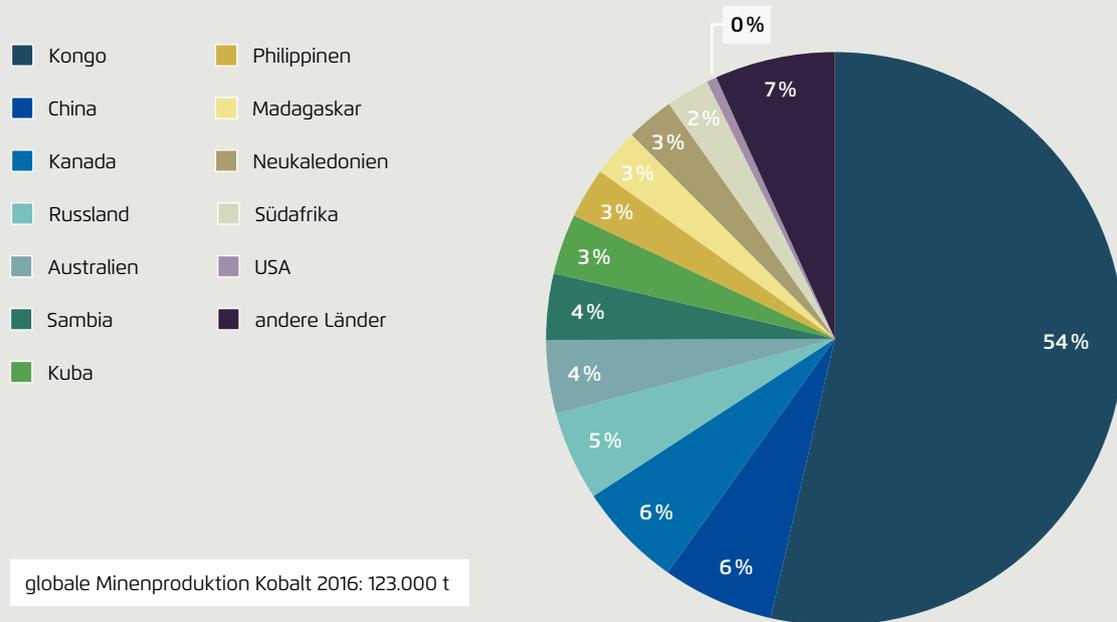
16 Gesamtbedarf wird aus Primärbedarf und Sekundärbedarf (Recycling) gedeckt.

17 Gesamtbedarf wird aus Primärbedarf und Sekundärbedarf (Recycling) gedeckt.

18 Grafitbedarf bezieht sich hier auf den Gesamtbedarf. Es wurde kein Recycling angenommen.

Globale Minenproduktion Kobalt 2016 (in Prozent der Förderländer)

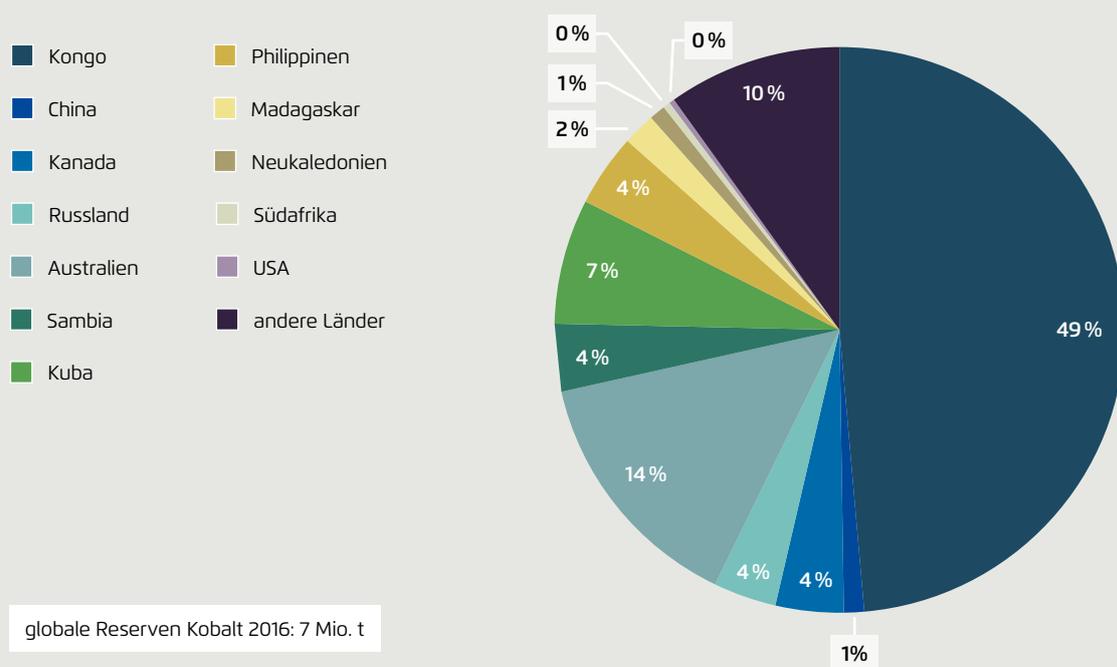
Abbildung 4.3



USGS 2017

Globale Reserven Kobalt 2016 (nach Staaten in Prozent)

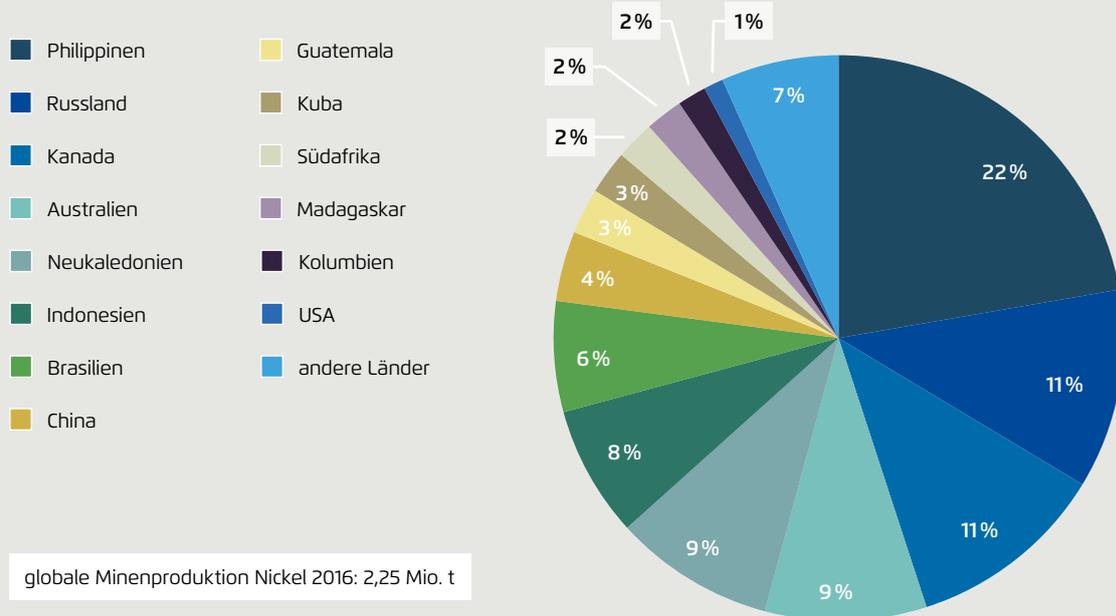
Abbildung 4.4



USGS 2017

Globale Minenproduktion Nickel 2016 (in Prozent der Förderländer)

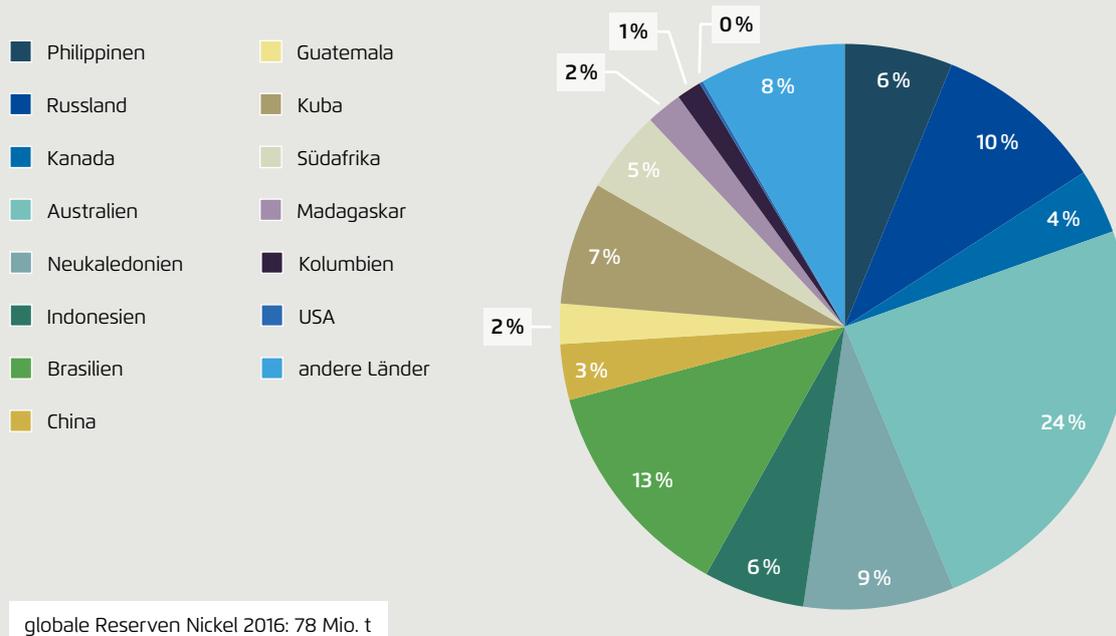
Abbildung 4.5



USGS 2017

Globale Reserven Nickel 2016 (nach Staaten in Prozent)

Abbildung 4.6



USGS 2017

Platin

Der Primärplatinbedarf für Brennstoffzellenfahrzeuge liegt im 2DS-Szenario im Jahr 2030 bei 10 Tonnen (45 Tonnen für Katalysatoren im konventionellen ICE-Pkw) und im Jahr 2050 bei 103 Tonnen (0 Tonnen für Katalysatoren im konventionellen ICE-Pkw).¹⁹ Die globale Minenproduktion von Platin betrug 2016 172 Tonnen, davon 70 Prozent in Südafrika, 13 Prozent in Russland und 8 Prozent in Simbabwe (USGS 2017). Die globalen Reserven der Platingruppenmetalle (Platin, Palladium, Rhodium, Osmium, Ruthenium, Iridium) betragen rund 67.000 Tonnen, davon 94 Prozent in Südafrika; die globalen Ressourcen werden auf über 100.000 Tonnen geschätzt (USGS 2017).²⁰ Im Falle von Platin muss auf Recyclingmaterial als sehr relevante Versorgungsquelle verwiesen werden. So deckte nach (BGR 2016) die Raffinadeproduktion aus Recycling im Jahr 2013 rund 25 Prozent des globalen Platinangebots ab. Nach zwei unterschiedlichen Szenarien nach (Schmidt 2015) könnte der Sekundäranteil 2018 bereits 28 bis 29 Prozent des globalen Platinangebots abdecken. Die globale *End-of-Life*-Recyclingrate liegt bei Platin deutlich zwischen 60 und 80 Prozent. (UNEP 2011). Die umfangreichen globalen Ressourcen und Reserven für Platin sowie das hohe Angebot aus dem Recycling lassen keine physischen Verknappungen erwarten.

Zusammenfassung

Für alle betrachteten Rohstoffe zeigen sich unterschiedlich starke Anstiege des Bedarfs und verschiedene Verhältnisse des Bedarfs zu den jeweiligen Reserven und Ressourcen. Auch unter Einbezug der anderen Anwendungsfelder für die untersuchten Rohstoffe sind aufgrund der sehr hohen Reserven und Ressourcen im Betrachtungszeitraum keine physischen Verknappungen der betrachteten Rohstoffe zu erwarten.

- Die deutlichsten Anstiege des Rohstoffbedarfs im Vergleich zur Primärförderung sind bei Lithium und Kobalt zu erwarten.
- Die globalen Nickelreserven und -ressourcen übertreffen den wachsenden Bedarf deutlich, die natürlichen Vorkommen sind auf viele Staaten der Erde verteilt.
- Dem wachsenden Graphitbedarf kann durch verstärkten Einsatz von Synthesegraphit begegnet werden.
- Bei Platin werden gegenläufige Entwicklungen erwartet, sodass einem Rückgang des Platinbedarfs für Fahrzeugabgaskatalysatoren ein zusätzlicher Bedarf in Brennstoffzellenfahrzeugen entgegensteht. Zusätzlich wird das bereits etablierte Platinrecycling den Druck auf die Primärförderung weiter senken.

4.2. Sind temporäre Verknappungen möglich?

Eine weitere Kernfrage für das Projekt lautet: Sind temporäre Verknappungen möglich? Unter temporären Verknappungen von Rohstoffen werden vorübergehende Verknappungen verstanden. Das heißt, bestimmte Rohstoffe stehen einige Wochen, einige Monate und im ungünstigsten Fall einige Jahre den Anwenderbranchen und den entsprechenden Technologien in nicht ausreichendem Maße zur Verfügung. Im Gegensatz zur physischen Verknappung, die wie oben ausgeführt für die ausgewählten Rohstoffe Lithium, Kobalt, Nickel, Graphit und Platin nicht festgestellt wurde, können temporäre Verknappungen aus unterschiedlichsten Gründen und mit unterschiedlicher Signifikanz auftreten. Ursachen für temporäre Verknappungen von Rohstoffen können sein:

- politische Krisen bis hin zu Kriegsereignissen in wichtigen Förderregionen, die die globale Rohstoffversorgung potenziell oder real deutlich beeinträchtigen;
- monopolartige Versorgungsstrukturen (bezogen auf Förderländer oder Unternehmen), die als politische Hebel benutzt werden könnten;
- Beeinträchtigung von bestimmten sehr wichtigen Minenproduktionen durch Naturereignisse (zum Beispiel Erdbeben, Überschwemmungen) und/oder schwere Unfälle (Dammbruch von Becken mit flüssigen/schlammartigen Bergbaurückständen);
- verzögerte Genehmigungen von neuen Bergbauprojekten beziehungsweise von Erweiterungen bestehender

19 Gesamtbedarf wird aus Primärbedarf und Sekundärbedarf (Recycling) gedeckt.

20 Das Öko-Institut schätzt den Anteil von Platin an den globalen Ressourcen und Reserven der sechs Platingruppenmetalle auf mindestens 30 Prozent ab.

Förderungen aus unterschiedlichsten Gründen.

- Das Nachfragewachstum für einen Rohstoff übersteigt das reale Wachstum auf der Angebotsseite (die Exploration und Erschließung von neuen Minenprojekten dauert Minimum fünf Jahre, häufig deutlich länger).
- Die Minenproduktion wird zum Beispiel durch Energie-, Wasserknappheit usw. beeinträchtigt.
- Der fragliche Rohstoff ist ein sogenanntes *minor metal*²¹ (vgl. Kobalt) und daher an die Nachfrage- und Angebotsentwicklung eines *major metals* gekoppelt.

Im Folgenden wird eine Einschätzung vorgenommen, wie wahrscheinlich temporäre Verknappungen der relevanten Rohstoffe sind.

Im Falle von **Lithium** besteht in den nächsten Jahrzehnten die Herausforderung, dass der globale Ausbau der Minenproduktion aus natürlichen Vorkommen mit dem erheblichen Nachfragewachstum aus der Elektromobilität Schritt hält. Der Einstieg in das industrielle Recycling von Lithium aus Batterien und anderen Lithiumanwendungen und dessen entschlossener Ausbau werden – siehe zum Beispiel den bereits erreichten Stand bei Platin – eine zunehmend wichtige Rolle spielen, um temporäre Verknappungen für Lithium auszuschließen. In den Empfehlungen in Kapitel 6 wird diese Herausforderung adressiert. Je nach Tempo der Fahrzeugelektrifizierung sind temporäre Verknappungen nicht auszuschließen. Vor allem das bisher fehlende Recycling spielt als zukünftige Rohstoffquelle eine entscheidende Rolle. Da Lithium bereits heute in vielen Ländern intensiv exploriert wird und damit neue Lagerstätten erschlossen werden sollen, sind längere temporäre Verknappungen allerdings nicht zu erwarten.

Die Frage einer temporären Verknappung der zukünftigen Versorgung mit **Kobalt** hängt entscheidend von den Entwicklungen in der Demokratischen Republik Kongo ab. In den letzten Jahren waren hier bezüglich Kobalt keine entsprechenden Probleme zu verzeichnen (auf das Thema Kongo und Kobalt wird weiter unten noch einmal intensiver eingegangen). Bei Kobalt ist das Recycling aus verschiedenen Anwendungen (Superlegierungen, Katalysatoren, Batterien) schon gut etabliert. Hier gilt es, die zukünftigen wachsenden Ströme an Recyclingmaterial

optimal zu sammeln, zu separieren und geeigneten Recyclinganlagen zuzuführen, die hohe Rückgewinnungsquoten bei minimierter Umweltbelastung garantieren. Kobalt wird überwiegend als *minor metal* gemeinsam mit Kupfer und Nickel gewonnen. Da für beide *major metals* ebenfalls eine steigende Nachfrage erwartet wird, führt dies ebenfalls zu einer wachsenden Kobaltförderung.

Sowohl die globale Minenproduktion als auch die globalen Reserven sind bei **Nickel** unter allen fünf untersuchten Materialien am weitesten gestreut, sodass temporäre Verknappungen durch politische Krisen, Monopolstrukturen usw. hier am wenigsten wahrscheinlich sind. Weiterhin wird Nickel sowohl über das Edelstahlrecycling als auch aus Katalysatoren und Batterien (sowohl aus Nickelmetallhydrid – als auch aus Lithium-Ionen-Batterien) im industriellen Maßstab recycelt. Durch den zukünftigen globalen Ausbau der Nickelrecyclingkapazitäten wird eine temporäre Verknappung von Nickel noch unwahrscheinlicher. Edelstahlrecycling ist allerdings ein eigenständiger Materialkreislauf. Die darin enthaltenen Nickelanteile stehen daher nicht für die hochreinen Nickelsalze, die für die Batterieproduktion notwendig sind, zur Verfügung.

Für die Versorgung des Elektromobilitätssektors mit **Grafit** wird Synthesegrafit eine immer relevantere Rolle einnehmen. Daher könnten temporären Verknappungen bei natürlichem Grafit durch zügigen Ausbau der entsprechenden Produktionskapazitäten für Synthesegrafit wirksam begegnet werden. Entscheidend ist hier, dass das Ausbautempo entsprechender Anlagekapazitäten dem zu erwartenden Nachfragewachstum für Grafit in der Elektromobilität adäquat angepasst wird. Eine temporäre Verknappung wird aufgrund der Substituierbarkeit nicht erwartet.

Für **Platin** können temporäre Verknappungen nicht völlig ausgeschlossen werden, da die gegenwärtige Minenproduktion und noch viel stärker die natürlichen Reserven an Platin auf Südafrika konzentriert sind. Vor allem die chronische Energieknappheit in Südafrika verursacht der dortigen Industrie inklusive der für Südafrika wichtigen Bergbauindustrie schon seit Jahren Probleme (Schnurpfeil 2015). Im Jahr 2012 kam es infolge von Streitigkeiten über Arbeitsbedingungen und Bezahlung zu einer Reihe von Streiks in PGM²²-Minen in Südafrika. Nur aufgrund einer

21 *minor metal* = als Nebenprodukt gefördertes Element eines Hauptproduktes (*major metal*).

22 Platin-Gruppen-Metalle

geringen Nachfrage in dem Jahr konnten Preissteigerungen und temporäre Lieferengpässe vermieden werden. Auch in Zukunft sind soziale Friktionen (Streiks etc.) im ehemaligen Apartheitsstaat mit entsprechenden Auswirkungen auf die Minenproduktion jederzeit möglich. Ein Aufwiegen von Produktionsverlusten in anderen Ländern aufgrund der Monopolstellung Südafrikas ist fast unmöglich, daher haben Streiks dieser Art das Potenzial, sowohl den Preis als auch die Produktionsmengen von Platin direkt zu beeinflussen. (Yager et al. 2013) Allerdings besteht global eine zunehmende Relevanz der Platinversorgung aus Sekundärquellen, sprich Recyclingmaterial. Daher und aufgrund der hohen Wertschöpfungsrelevanz sind temporäre Verknappungen für Platin wahrscheinlich nur für kürzere Zeiträume denkbar.

Fazit temporäre Verknappungen

Aufgrund der vielfältigen Ursachen können temporäre Verknappungen nie ganz ausgeschlossen werden. Dabei liegen die größten Unsicherheiten bei Lithium (stärkster Nachfrageanstieg und bisher kein Recycling) und Kobalt (regionale Konzentration der Förderung und Reserven im Kongo bei sozialen Risiken). Mögliche temporäre Verknappungen von Rohstoffen sind jedoch generell nicht als Showstopper der Elektromobilität zu werten. Sie könnten im ungünstigen Verlauf jedoch eine Elektrifizierung des Verkehrssektors bezüglich Marktdurchdringung zeitlich etwas verzögern.

4.3. Kann die Elektromobilität durch extreme Preissteigerungen für strategische Rohstoffe ausgebremst werden?

Zur Beantwortung der Frage des möglichen Einflusses der Rohstoffpreise auf die Entwicklung der Elektromobilität wird in diesem Abschnitt auf die Rohstoffpreise der wesentlichen Zellmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien näher eingegangen. In der Tabelle 4.1 sind die Durchschnittspreise (August 2016 bis Juli 2017) der Rohstoffe für wesentliche Zellmaterialien der Batterien dargestellt. Neben den in diesem Bericht intensiv behandelten Rohstoffen Lithium, Kobalt, Nickel und Grafit ist der Vollständigkeit halber auch Mangan noch mit aufgeführt.

Rohstoffpreise der wesentlichen Zellmaterialien für eine NMC-Batterie in Dollar je Kilogramm Tabelle 4.1

Lithium*	10,99
Mangan	2,12
Kobalt	45,40
Nickel	10,08
Grafit	0,80

* Preis je kg Lithiumcarbonat
Hinweis: Durchschnitt August 2016 bis Juli 2017
DERA 2017

Um die Relevanz der Rohstoffkosten auf die Gesamtkosten einer typischen Lithium-Ionen-Batterie für einen Pkw mit vollelektrischem Antrieb einschätzen zu können, werden die Rohstoffkosten für die betrachteten Zellmaterialien für eine 30 Kilowattstunden Lithium-Ionen-Batterie (Nickel-Mangan-Kobalt) für einen BEV-Pkw abgeschätzt und in das Verhältnis zu den gesamten Batteriekosten gesetzt. Die absoluten Rohstoffkosten für die fünf betrachteten Zellmaterialien betragen fast 1.400 Dollar je Batterie (siehe Tabelle 4.2).

Rohstoffkosten der wesentlichen Zellmaterialien einer NMC-Batterie (30 kWh, NMC 1:1:1) in Dollar/Batterie Tabelle 4.2

Lithium	571
Mangan	27
Kobalt	618
Nickel	137
Grafit	39
Summe	1392

Hinweis: Durchschnitt August 2016–Juli 2017,
DERA 2017

In der nachfolgenden Abbildung findet sich eine Aufteilung der Rohstoffkosten für die wesentlichen Zellmaterialien untereinander, die für eine typische BEV-Pkw-Batterie benötigt werden.²³ Aus dem Tortendiagramm ist klar ersichtlich, dass die Rohstoffkosten von Lithium und Kobalt unter den fünf betrachteten Zellmaterialien den wesentlichen Beitrag liefern: zusammen rund 85 Prozent nach aktuellen Rohstoffpreisen.

Hinsichtlich der Gesamtkosten für Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge zeigten sich in den letzten Jahren stark fallende Kosten je Kilowattstunde. Weiterhin stark fallende Kosten je Kilowattstunde werden für die nächsten Jahre erwartet (IEA 2017). In der nachfolgenden Abbildung ist einerseits der Anteil der aktuellen Rohstoffkosten bei aktuell angenommenen Gesamtkosten für die Batterie von 350 Dollar je Kilowattstunde aufgeführt.

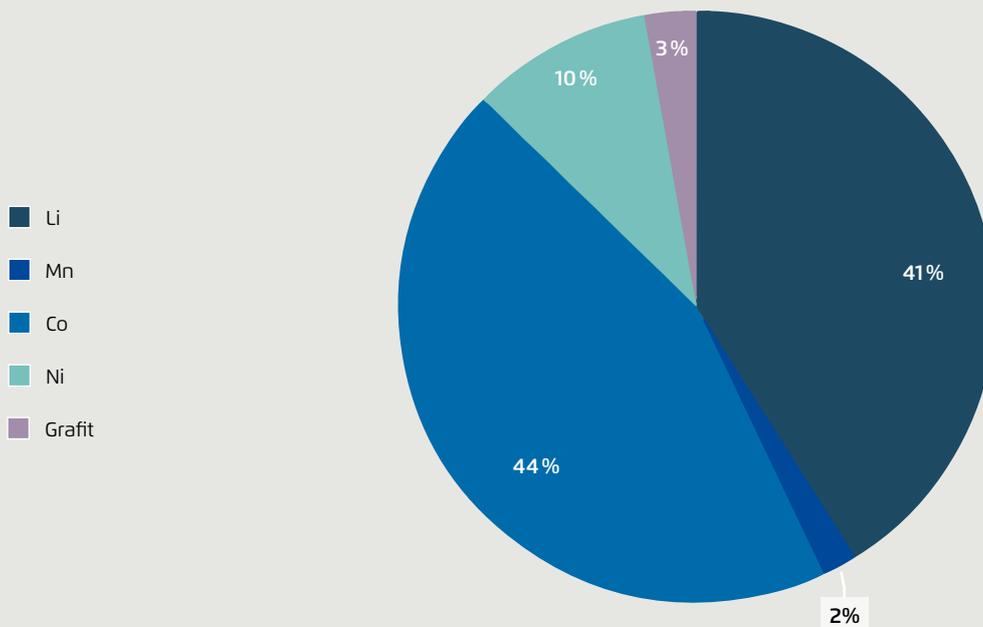
Bei einer 30-Kilowattstunden-Batterie belaufen sich die Gesamtkosten auf 10.500 Dollar für die Batterie. Davon entfallen auf die Rohstoffkosten der wesentlichen Zellmaterialien rund 13 Prozent. Da die spezifischen Batteriepreise (je Kilowattstunde) ständig weiter zurückgehen, ist als Sensitivität in der Abbildung 4.8 der Anteil der Rohstoffkosten bei spezifischen Batteriekosten von 200 Dollar je Kilowattstunde dargestellt. Bei Gesamtkosten von dann 6.000 Dollar würden rund 23 Prozent auf die Rohstoffkosten für die Zellmaterialien entfallen.

Die Kostenabschätzungen zeigen, dass gegenwärtig die Rohstoffkosten für die fünf betrachteten Zellmaterialien einen relevanten, aber keinen überragenden Anteil an den Gesamtkosten für eine BEV-Batterie ausmachen. Die bereits erzielten und in naher Zukunft zu erwartenden Rückgänge der spezifischen (je Kilowattstunde) Batteriekosten, die vor allem mit verbesserten Produktionsprozessen und Effizienzgewinnen durch erheblich größere Produktionseinheiten für Batteriezellen

23 Nickel-Mangan-Kobalt-(NMC-)Batterie im stöchiometrischen Verhältnis 1:1:1 dieser drei Metalle

Aufteilung der Rohstoffkosten (Durchschnitt August 2016 bis Juli 2017, nur wesentliche Zellmaterialien) einer BEV-Pkw-(NMC-1:1:1-)Batterie

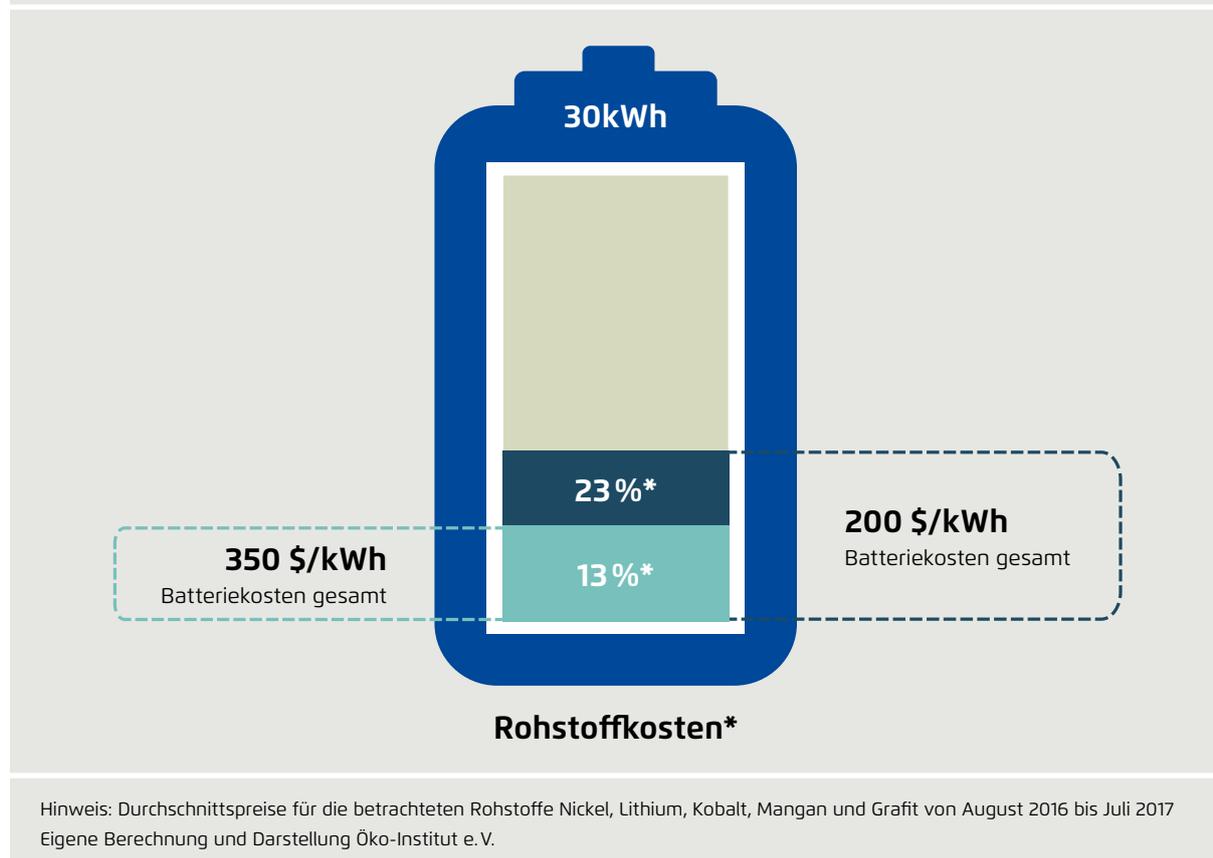
Abbildung 4.7



Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V.; Rohstoffpreise nach DERA 2017

Anteile der Rohstoffkosten der wesentlichen Zellmaterialien bei einer 30-Kilowattstunden-Pkw-BEV-(NMC-)Batterie bei variablen Gesamtbatteriekosten

Abbildung 4.8



(Gigafactory, economies of scale) verbunden sind, werden aller Voraussicht nach denkbare Erhöhungen von Rohstoffpreisen überkompensieren. So würde bei einer dauerhaften Verdopplung der Rohstoffpreise der fünf wesentlichen Zellmaterialien – dies wäre ein erheblicher Anstieg – die 30-Kilowattstunde-BEV-Batterie rund 1.400 Dollar teurer werden. Ein Rückgang der spezifischen Batteriekosten von 350 auf 200 Dollar je Kilowattstunde²⁴ würde brutto 4.500 Dollar einsparen (bei gleichbleibenden Rohstoffkosten) und netto – nach Abzug der höheren Rohstoffpreise (verdoppelt) – würde die Gesamteinsparung immerhin noch 3.100 Dollar betragen.

24 Längerfristig werden gar spezifische Batterieprieße von rund 100 Dollar je Kilowattstunde für erreichbar gehalten (IEA 2017).

Fazit Preissteigerungen

Die Ausführungen und Beispielrechnungen zeigen, dass steigende Rohstoffpreise als Showstopper für die Elektromobilität wenig wahrscheinlich sind. Bei der Zusammensetzung der nächsten Generation von Nickel-Mangan-Kobalt-Zellen wird außerdem der Gehalt des relativ teuren Kobalts bereits reduziert sein – vom stöchiometrischen Verhältnis 1:1:1 auf 6:2:2 (Umicore 2017). – Das heißt, es findet auch auf der Seite der Zellenzusammensetzung bereits eine Optimierung nach Kostengesichtspunkten statt. Dennoch sind mögliche Einflüsse durch Preissteigerungen von Rohstoffen auf die Wettbewerbsfähigkeit von zum Beispiel vollelektrischen Pkw nicht von der Hand zu weisen, da die Rohstoffkosten insgesamt für Lithium-Ionen-Batterien und Brennstoffzellen einen relevanten (wenn auch nicht überragenden)

Anteil an den Produktionskosten ausmachen. Dies gilt vor allem dann, falls eine Reihe von Schlüsselrohstoffen durch deutliche Preisanstiege betroffen wäre. Allerdings zeigen die Erfahrungen der letzten Jahre am Beispiel der Seltenen Erden, dass deutlichen Preissteigerungen auf verschiedenen Ebenen (technologische Innovationen, Eintritt neuer Förderländer in den Markt usw.) durchaus entgegengewirkt werden kann. Eine möglichst breite Streuung an Förderländern und involvierten Unternehmen auf der Angebotsseite erhöht den Wettbewerb und kann tendenziell extremen Preissprüngen entgegenwirken. Nichtsdestotrotz sind Spekulationseffekte bei Rohstoffpreisen keinesfalls zu unterschätzen.

Für alle dieser Studie untersuchten Metalle (Platin, Kobalt, Nickel und Lithium) gilt wiederum, dass eine nachhaltige Stärkung des Recyclingsektors in diesem Bereich die globale Versorgung bei diesen Rohstoffen breiter streut und damit extremen Preissprüngen entgegenwirkt.

4.4. Können vermehrt negative sozioökonomische und ökologische Auswirkungen infolge zusätzlicher Primärförderung entstehen?

In Kapitel 3 ist deutlich geworden, dass von einem zum Teil deutlichen Anstieg der Nachfrage bei den betrachteten Rohstoffen Lithium, Kobalt, Grafit, Platin und Nickel bei einer stärkeren Elektrifizierung des Mobilitätssektors auszugehen ist. Weiterhin können nur Teile des Bedarfs über Recycling abgedeckt oder substituiert werden. Folglich muss die steigende Nachfrage über eine größere Primärförderung abgedeckt werden. Die bergbauliche Gewinnung kann je nach Rohstoff, Herkunftsland und angewendetem Standard unterschiedliche sozioökonomische und ökologische Wirkungen haben. Insbesondere afrikanische Länder haben mit der Formulierung der *Afrika Mining Vision* unterstrichen, dass auf Wachstumsimpulse aus dem Bergbau gesetzt wird, die positive Auswirkungen auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung des Kontinents haben könnten (African Union 2009). Auf der anderen Seite unterstreicht der *Dodd-Frank Act*²⁵ im

Jahr 2010 die Problematik der Konfliktminerale (Rüttinger, Griestop 2015). Infolge der Debatten um Konfliktminerale wurde eine Reihe von Initiativen, Standards und Zertifizierungsmechanismen ins Leben gerufen, welche darauf abzielen, die negativen sozioökonomischen und ökologischen Auswirkungen des Bergbaus zu minimieren. In den letzten Jahrzehnten ist das Bewusstsein für einen verantwortungsvollen Bergbau und die Etablierung von Standards deutlich vorangeschritten, nichtsdestotrotz wird der Abbau primärer Rohstoffe nach wie vor von negativen Sozial- und Umweltauswirkungen begleitet. Nachfolgend werden die größten sozialen und ökologischen Risiken für die betrachteten Rohstoffe zusammengetragen.

Lithium

Die bergbauliche Produktion von Lithium ist von zwei unterschiedlichen Fördermethoden geprägt. Zum einen wird im Festgesteinsbergbau überwiegend das Mineral Spodumen abgebaut, insbesondere in Australien, wo knapp die Hälfte (45 Prozent) der Weltproduktion gefördert wird. Zum anderen ist die Gewinnung von Lithium aus Salzseen vor allem in Südamerika verbreitet, insbesondere in Chile, wo ein Drittel der globalen Produktion stattfindet (siehe Abbildung 4.9).

Mehr als die Hälfte aller Reserven liegen in Chile, ein Fünftel in China und jeweils etwa ein Zehntel in Argentinien und Australien. Damit kommt sowohl ein Großteil der Produktion als auch ein großer Teil der Reserven aus politisch stabilen Ländern.

Die beiden unterschiedlichen Abbaumethoden weisen sehr unterschiedliche ökologische Risiken auf. Beim Abbau von Spodumen in Australien wird das Erz in der Regel im Tagebau gewonnen und unter großem Energieaufwand zerkleinert und gemahlen. Anschließend wird das Erz im Ofen auf 1.150 Grad Celsius erhitzt. Danach wird Schwefelsäure eingesetzt, um Lithiumsulfat zu bilden, welches aufkonzentriert und unter Zugabe von Natriumcarbonat Lithiumcarbonat bildet, welches das Endprodukt darstellt (Evans 2014).

Bei der Gewinnung aus Salzseen wird die lithiumhaltige Salzlauge in Evaporationsbecken gepumpt, in denen die Lithiumsalze mithilfe von natürlicher Sonnenenergie konzentriert werden. Je nach chemischer Zusammen-

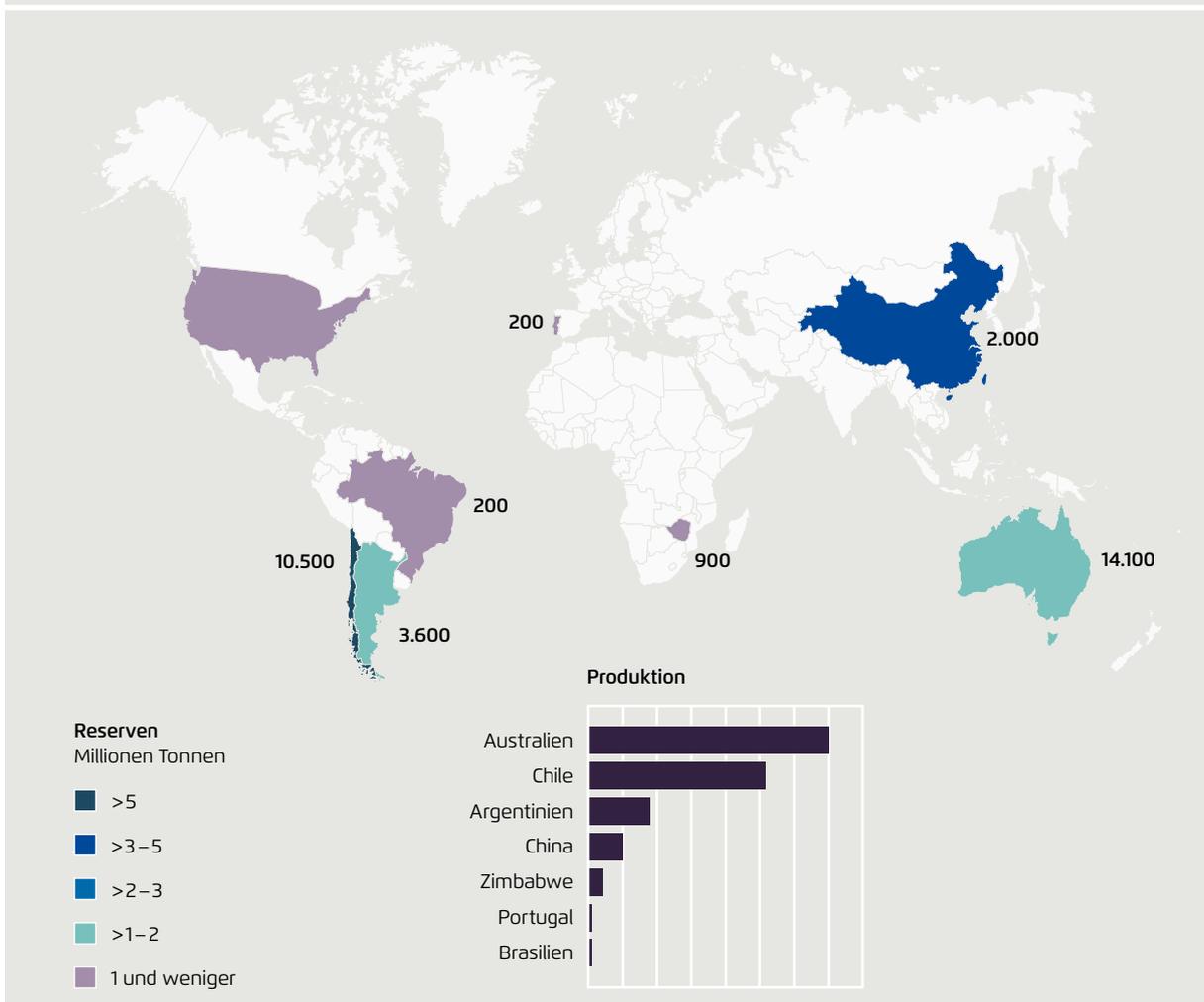
25 Insbesondere die Sektionen 1502 und 1503 des *Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act*

setzung der Salzlauge können unterschiedliche Verfahren zum Einsatz kommen. In mehreren Schritten wird die Lauge durch Evaporation und durch das Ausfällen ungewünschter Bestandteile bis auf einen Gehalt von etwa sechs Prozent Lithiumchlorid konzentriert, anschließend wird unter Zugabe von Natriumcarbonat das Endprodukt Lithiumcarbonat gebildet (Evans 2014). In (Grosjeana et al. 2012) wird die Lithiumgewinnung aus Salzseen aufgrund der einfachen Aufbereitung unter Nutzung von Sonnenenergie als umweltfreundlich eingestuft.

Beide Abbaumethoden können unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt und die lokale Bevölkerung haben. Der Abbau von Spodumen in Australien birgt die gängigen Umweltgefährdungspotenziale eines Erzbergbaus. Beim Spodumenabbau ist vor allem der Energiebedarf von Bedeutung und damit sind Treibhausgasemissionen sowie der Anfall von Bergbauabfällen zu nennen. Darüber hinaus kann die bei der Aufbereitung verwendete Schwefelsäure bei Handhabungsfehlern in die Umwelt gelangen (BGS 2016). Bei der Gewinnung aus Salzseen ist vor allem der Einsatz von Wasser als kritisch anzusehen, da die Seen

Globale bergbauliche Lithiumproduktion 2015 und Reserven

Abbildung 4.9



Hinweis: Farbgebung der Länder bezieht sich auf die Reserven; Daten in den Ländern stellen die Jahresproduktion dar. Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e. V. nach USGS 2017

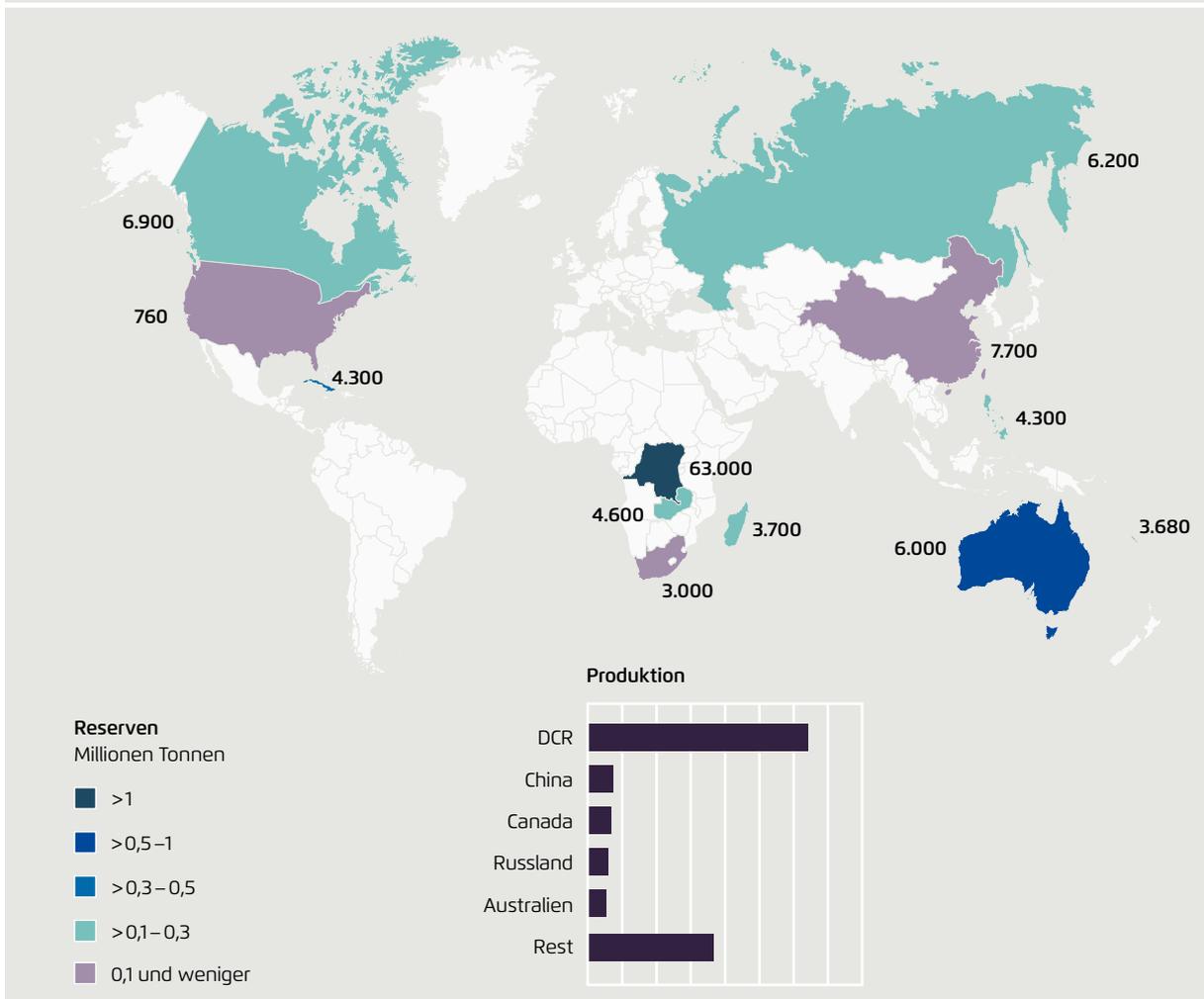
zumeist ohnehin in stark ariden Gebieten liegen (Swiss Resource Capital 2016). Diverse Konflikte in Wasserstressgebieten zwischen der lokalen Bevölkerung und Bergbauunternehmen sind bekannt (FOE 2013). Es gibt bereits Ansätze, die lithiumhaltigen Laugen aus Salzseen direkt aufzubereiten, ohne diese vorher in Evaporationsbecken zu konzentrieren. Die Lauge wird dabei aus den Salzseen gepumpt und aufbereitet, anschließend wird die Lauge, aus der das Lithium entnommen wurde, wieder in der See entlassen. Diese Art der Produktion könnte zu einer Einsparung von Wasser führen (International Mining 2017; Pure Energy Minerals 2017).

Kobalt

Kobalt wird derzeit überwiegend im industriellen Maßstab als Nebenprodukt des Kupfer- oder Nickelbergbaus gewonnen. In der Demokratischen Republik Kongo trug der Kleinbergbau über die Förderung von Kobalterzen in den Jahren 2015 und 2016 15 bis 20 Prozent zur Gesamtproduktion des Landes bei (Al Barazi 2017). Der Kobaltabbau ist in erster Linie aufgrund der angespannten politischen Situation in der Demokratischen Republik Kongo aus sozioökonomischer Sicht kritisch zu betrachten. Fast die Hälfte der globalen Kobaltproduk-

Globale bergbauliche Kobaltproduktion 2015 und Reserven

Abbildung 4.10



Hinweis: Farbgebung der Länder bezieht sich auf die Reserven; Daten in den Ländern stellen die Jahresproduktion dar. Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e. V. nach USGS 2017

tion kommt aus diesem Land. Die restliche Produktion ist relativ ausgewogen auf andere Länder verteilt. Auch bei den Reserven ist die DR Kongo mit fast der Hälfte der Kobaltvorkommen global dominierend. Australien liegt mit etwa zwei Dritteln weniger Reserven auf Rang zwei (siehe Abbildung 4.10). Damit ist auch künftig davon auszugehen, dass der Kongo eine wesentliche Rolle bei der Versorgung der Märkte spielen wird.

Direkte Zusammenhänge zwischen der Finanzierung bewaffneter Gruppen und dem Abbau von Gold, Wolfram, Zinn und Tantal im Ostkongo sind nachgewiesen. Dementsprechend werden diese als sogenannte Konfliktminerale klassifiziert. Seit 2010 besteht durch den Erlass des *Dodd-Frank Acts* eine Berichts- und Sorgfaltspflicht für amerikanische Unternehmen, die Konfliktminerale aus dem Kongo importieren (Al Barazi 2017). Als wesentliche Anleitung zum Umgang mit diesen Pflichten hat die OECD ein fünfstufiges Programm entwickelt, welches Unternehmen dabei helfen soll, Risiken entlang der Handelskette zu minimieren. (OECD 2016)

Obwohl Kobalt selbst nicht zu den Konfliktmineralen zählt, entstehen aufgrund des artisanal gewonnenen Anteils und ähnlicher Rahmenbedingungen ebenso Risiken. Generell sind insbesondere zwei Risiken zu nennen. Zum einen ist der Kleinbergbau aufgrund des informellen Charakters häufig von Kinderarbeit und schlechten Arbeitsbedingungen geprägt. Auf der anderen Seite entstehen Risiken (wie zum Beispiel Korruption und irreguläre Besteuerung) aufgrund schwacher staatlicher Strukturen und der politischen Situation im Kongo (Al Barazi 2017).

Bezogen auf die Umwelt ist vor allem folgender Punkt von Bedeutung: Kupfer-Kobalt-Lagerstätten sind häufig mit sulfidischen Mineralen vergesellschaftet und bergen daher das Risiko, saure Grubenwässer zu generieren (*Acid Mine Drainage*²⁶). Häufig lässt sich die Bildung von *Acid Mine Drainage* nur schwer vermeiden. Präventive Maßnahmen sind beispielsweise das Abdecken von Abfall- und Reststoffen mit Membranen oder mit Schichten tonhaltiger Minerale wie beispielsweise Bentonit. Zudem werden alkalische Chemikalien eingesetzt,

können aber die Bildung von Säure nicht immer langfristig gewährleisten. Liegen bereits saure Grubenwässer vor, kommt häufig Kalk zum Einsatz, um den pH-Wert auszugleichen (Pozo-Antonio et al. 2014).

Nickel

Die Nickelproduktion ist im Gegensatz zu den anderen betrachteten Rohstoffen deutlich weniger regional konzentriert. Die größte bergbauliche Produktion findet auf den Philippinen statt und macht knapp ein Viertel der Gesamtproduktion aus. Daneben steuern Russland, Kanada und Australien jeweils etwa ein Zehntel zur Weltproduktion bei. Die restliche Produktion ist auf mehr als zehn Länder mit vergleichbaren Anteilen verteilt. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Reserven. Knapp ein Viertel liegt in Australien sowie jeweils etwa ein Zehntel in Russland und Brasilien. Die restlichen Reserven sind auf eine Vielzahl an Ländern verteilt, die alle zwischen ein und acht Prozent der Gesamtreserven halten (USGS 2017).

Nickel wird etwa zu gleichen Teilen aus sulfidischen Erzen und lateritischen Lagerstätten gewonnen. Beide Arten des Abbaus werden von unterschiedlichen Umweltauswirkungen begleitet. Nickel aus sulfidischen Erzen ist meistens mit Platin-Gruppen-Metallen, Kupfer und Kobalt vergesellschaftet und kann sowohl im Untertage- als auch im Tagebau gefördert werden. Sulfidische Erze bergen sowohl im Untertage- als auch im Tagebau das Potenzial, saure Grubenwässer (AMD) zu bilden, welche zu nachhaltig negativen Einwirkungen auf Boden und Wasser führen können.

Der größere Teil der Nickelreserven liegt in lateritischen Lagerstätten vor, welche meist nah an der Oberfläche liegen und daher im Tagebau abgebaut werden. Lateritische Lagerstätten sind mit höherem Energieaufwand bei der Aufbereitung verbunden als sulfidische Erze, unter anderem aufgrund einer hohen Feuchte im Erz. Daraus ergibt sich für lateritische Lagerstätten ein höheres Treibhausgaspotenzial, welches zwischen 25 und 46 Tonnen CO₂ je produzierter Tonne primärem Metall liegt. Sulfidische Erze erreichen weniger als 10 Tonnen CO₂ je Tonne Metall. Beide Lagerstättentypen werden vom Ausstoß von Schwefeldioxid begleitet, welcher sauren Regen hervorruft. Durch Optimierung in der Aufbereitung

26 *Acid Mine Drainage (AMD)*: Sulfidische Erze können durch Sauerstoff und Wasser Schwefelsäure bilden, welche wiederum Schwermetalle aus dem Erz lösen und Gewässer und Umwelt nachhaltig schädigen.

kann der Ausstoß von Schwefeldioxid deutlich reduziert werden (Mudd 2010).

Durch den Nickelbergbau kam es in Kanada und Russland zu weitreichenden negativen Auswirkungen, welche sich vor allem durch einen Biodiversitätsverlust, sauren Regen und die Kontamination mit Schwermetallen äußern (Mudd 2010). Soziale Folgen sind meist umweltinduziert und betreffen gesundheitliche Auswirkungen und den Verlust landwirtschaftlicher Nutzflächen.

Grafit

Grafit wird sowohl bergbaulich gefördert als auch synthetisch hergestellt. Fast zwei Drittel der globalen bergbaulichen Produktion kommen aus China. Weiterhin tragen Indien mit 14 Prozent und Brasilien mit knapp 7 Prozent nennenswerte Mengen zur globalen Produktion bei. Die restliche bergbauliche Förderung ist auf zehn Länder mit geringen Produktionsmengen verteilt. Die Reserven sind weniger stark konzentriert, verteilen sich allerdings zum großen Teil auf drei Länder. Mehr als ein Drittel der Reserven sind in der Türkei, weniger als ein Drittel in Brasilien und etwa ein Fünftel in China. (USGS 2017)

Die Primärförderung von Grafit in China ist vor allem aufgrund des günstigeren Preises gegenüber anderen Standorten zu erklären. Nicht zuletzt wird dieser Wettbewerbsvorteil durch geringere Umwelt- und Sozialstandards erkaufte. Berichten der *Washington Post* zufolge werden viele chinesische Grafitabbaustandorte von massiven Staubemissionen begleitet. Die Stäube setzen sich in der unmittelbaren Umgebung ab und beeinträchtigen die Gesundheit der Anwohner, ebenso werden die Gewässer durch Rückstände der Aufbereitung verunreinigt. (Whoriskey 2016)

Künftig rechnet man mit einem Zuwachs synthetischer Grafitproduktion, allerdings wird nach wie vor die bergbauliche Gewinnung eine wesentliche Rolle spielen.

Platin

Platin kommt immer mit anderen Elementen der Platin-Gruppen-Metalle (Palladium, Rhodium, Ruthenium, Iridium, Osmium) vor und wird daher nicht isoliert abgebaut. Die Weltproduktion ist sehr stark auf Südafrika konzentriert, wo fast drei Viertel des Platins abgebaut wird. Außerdem werden mehr als zehn Prozent in Russland und etwa sieben Prozent in Simbabwe gefördert. Die zentrale Stellung Südafrikas ist bei der Betrachtung der Reserven noch deutlicher, wo fast 95 Prozent der Platin-Gruppen-Metall-Vorkommen konzentriert sind (USSG 2017).

Umweltseitige Probleme beim Platin-Gruppen-Metall-Bergbau ergeben sich beispielsweise beim Abbau sulfidhaltiger Erze. Diese weisen ein hohes AMD-Potenzial auf und damit ein Risiko, die Umwelt durch Verschmutzung der Gewässer mit Schwermetallen und dem Herabsetzen des pH-Wertes zu belasten. (Gunn 2014) Weiterhin enthalten die Erze im Schnitt nur 0,002 Prozent Platin-Gruppen-Metalle. Dadurch fallen große Mengen bergbaulicher Reststoffe an. Ferner sind damit ein hoher Energieaufwand und enorme Treibhausgasemissionen bei der Aufbereitung verbunden. (Gunn 2014) Vor allem das enorm hohe Treibhausgaspotenzial der Primärplatinherstellung spielt eine wesentliche Rolle bei der Bewertung der Umweltbelastungen. Mit 14.000 Tonnen CO₂ je produzierter Tonne Primärmetall liegen die Emissionen um ein Vielfaches höher als beispielsweise bei Kupfer, mit 3,4 Tonnen CO₂ je Tonne Metall (Hagelüken, Buchert 2008). Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass die globale jährliche Primärplatinproduktion weniger als 200 Tonnen beträgt.

Die südafrikanische Regierung hat bereits mit einem Programm begonnen, welches das Eindämmen umweltseitiger Belastungen bei der primären Förderung von Platin-Gruppen-Metallen zum Ziel hat. (Gunn 2014)

Soziale Probleme bei der Platinförderung in Südafrika resultieren vor allem aus Ausschreitungen zwischen Minenarbeitern und Minenbetreibern. Im Jahr 2012 kam es infolge von Streitigkeiten über Arbeitsbedingungen und Bezahlung zu einer Reihe von Streiks in PGM²⁷-Minen in Südafrika. Infolge der Streiks kam es zu Gewaltausschreitungen zwischen den Arbeitern und

der Polizei, bei denen 78 Minenarbeiter verletzt und 34 erschossen wurden. Der Vorfall ist weitgehend als das „Massaker von Marikana“ bekannt. Nach dem Vorfall wurden Schlichtungsgespräche geführt, welche zu signifikanten Lohnerhöhungen führten und damit den Streik beendeten (Chetty 2016). Allerdings sind die Arbeits- und Lebensbedingungen vor Ort nach wie vor schlecht, sodass nur unzureichender Zugang zu Elektrizität, Wasser und sanitären Einrichtungen gewährleistet ist. Trotz Anstrengungen von Regierung und Minenbetreiber treten Verbesserungen nur langsam ein (Nicolson 2015).

Aufgrund der deutlich besseren Umweltbilanz und der weitaus diversifizierteren Anbieterstruktur sollte nicht zuletzt künftig ein steigender Anteil der Produktion durch Recycling abgedeckt werden, um negative ökologische Effekte abzufedern.

Fazit sozioökonomische und ökologische Auswirkungen

Für die Primärgewinnung der untersuchten Rohstoffe können negative sozioökonomische und ökologische Auswirkungen nicht ausgeschlossen werden. Die steigende Nachfrage nach diesen Schlüsselrohstoffen erhöht den Druck auf rohstoffspezifische Maßnahmen für eine Primärgewinnung, die negative sozioökonomische und ökologische Auswirkungen weitgehend vermeidet. In Abschnitt 6 findet sich eine Reihe wichtiger Handlungsempfehlungen, die entsprechende Strategien vorbereiten und unterstützen sollen.

An dieser Stelle sei unterstrichen, dass eine einseitige Betrachtung der möglichen sozioökonomischen und ökologischen Auswirkungen des verstärkten Abbaus von Schlüsselrohstoffen der Elektromobilität aus Nachhaltigkeitssicht nicht zielführend und angemessen ist. Durch die steigende Elektrifizierung des Verkehrssektors werden mittel- und langfristig gewaltige Mengen anderer Rohstoffe eingespart. Allen voran kann auf die Einsparung von Rohöl verwiesen werden (siehe folgender Kasten).

Rohöleinsparung durch elektrische Antriebe

Durch eine stark wachsende Verbreitung elektrischer Antriebe werden neben entsprechend ansteigender Nachfrage nach den dafür notwendigen Rohstoffen auch Rohstoffe eingespart. Vergleicht man die beiden Szenarien, ergibt sich für das Jahr 2050 eine ungefähre Einsparung von 1,6 Milliarden Tonnen Rohöl im 2DS- gegenüber dem 4DS-Szenario.

Damit einhergehend werden entsprechende Umwelt- und Sozialwirkungen vermieden, wie etwa die Emission von rund fünf Milliarden Tonnen Kohlendioxid allein im Jahr 2050. Darüber hinaus können bei der Förderung, Verarbeitung und dem Transport von Rohöl weitreichende Auswirkungen entstehen, die die Umwelt nachhaltig belasten (vgl. Ecuador, Nigeria, Alaska usw.).

Bei der Betrachtung der negativen Wirkungen, die durch eine höhere Nachfrage nach strategischen Rohstoffen für die Elektromobilität entstehen, müssen mögliche Einsparungen von Rohöl und eine damit einhergehende Reduktion der Umwelt- und Sozialwirkungen in Ölförderländern daher unbedingt berücksichtigt werden.

05 | Lösungsstrategien

In den vorangegangenen Abschnitten ist deutlich geworden, dass von einer zum Teil signifikant höheren Nachfrage nach strategischen Rohstoffen für die Elektromobilität auszugehen ist. Daraus erwachsen Herausforderungen, denen begegnet werden muss, um negative Auswirkungen und Versorgungsrisiken zu verhindern oder zu minimieren. Dieses Kapitel widmet sich daher der zentralen Fragestellung: Welche Lösungsmöglichkeiten bestehen für alle wesentlichen Herausforderungen?

Zunächst ist eine Dämpfung der Nachfrage nach natürlichem Lithium, Kobalt, Platin, Nickel und Grafit anzustreben, ohne die Entwicklung der Elektromobilität auszubremsen. Diese Reduktion kann teilweise erzielt werden durch eine Steigerung der Materialeffizienz. Weiterhin muss auf Substitution der relevanten Materialien gesetzt werden – eine Ausnahme bildet Grafit, da bereits Synthesegrafit auf dem Markt etabliert ist. Bereits heute werden zum Teil beträchtliche Mengen der Nachfrage von Kobalt, Nickel und Platin über Sekundärmaterial abgedeckt. Durch eine weitere Steigerung des Recyclings können signifikante Mengen bei der Primärförderung eingespart werden. Für den Rohstoff Lithium ist ein Einstieg und Ausbau des Recyclings in den nächsten Jahren unbedingt vorzunehmen.

Weiterhin ist bei der auch zukünftig notwendigen und wachsenden Primärförderung – vor allem der vier untersuchten Metalle – wichtig, dass die Reduzierung der negativen ökologischen Auswirkungen in den Förderländern durch Einhaltung von anspruchsvollen Umweltstandards umgesetzt wird. Ferner muss den Risiken sozialer Konflikte im Zusammenhang mit der Primärförderung durch Einhaltung von unternehmerischen Sorgfaltspflichten und global geltenden Richtlinien begegnet werden. Ebenso müssen faire Kooperationsprojekte mit Primärförderländern umgesetzt werden, um einen Wissenstransfer zu gewährleisten und die notwendige Steigerung der Primärförderung von Schlüsselrohstoffen umwelt- und sozialverträglich zu realisieren.

06 | Strategische Handlungsempfehlungen

Für eine Strategie zur nachhaltigen Rohstoffversorgung der Elektromobilität wurden im Rahmen der Studie sieben zentrale Handlungsempfehlungen entwickelt. Die Handlungsempfehlungen leiten sich aus den der Studie zugrundeliegenden Kernfragen ab und beschreiben die wesentlichen Handlungsfelder, um in der Zukunft die Rohstoffversorgung der Elektromobilität auf der einen Seite mengenmäßig und kostenseitig möglichst stabil zu sichern. Auf der anderen Seite zielen die Handlungsempfehlungen darauf ab, die soziale und umweltseitige Integrität der Rohstoffgewinnung zu fördern und abzusichern.

In Tabelle 6.1 sind die sieben Empfehlungen in Bezug auf die handelnden Akteure und mögliche Umsetzungsräume zusammengefasst und bewertet. Der Fokus liegt dabei auf Initiatoren auf nationaler Ebene, die in der Lage sind, notwendige internationale Koordinations- und Kooperationsprozesse auf europäischer oder globaler Ebene anzustoßen.

Die Handlungsempfehlungen werden in den folgenden Unterkapiteln einzeln erläutert. Die Reihenfolge der Handlungsempfehlungen stellt keine Priorisierung dar.

6.1. Globale Industriellianz für nachhaltiges Lithium

Agora Verkehrswende und Öko-Institut empfehlen den Aufbau einer weltweiten Industrieinitiative für nachhaltiges Lithium.²⁸ Diese Studie hat gezeigt, dass sowohl mittel- als auch langfristig (2030/2050) mit einem deutlich steigenden Bedarf an Lithium durch die zu erwartende Entwicklung der Elektromobilität zu rechnen ist. Der wachsende Bedarf wird deutlichen Druck auf den Bereich der Primärgewinnung von Lithium ausüben, was

28 Unter „Lithium“ werden in der Praxis Lithiumsalze und andere Lithiumverbindungen subsummiert.

Lösungsstrategien und Handlungsempfehlungen	Abbildung 6.1
<p>Monitoring</p> <p>→ Rohstoffradar Elektromobilität</p>	
<p>Dämpfung der Nachfrage für Primärstoffe</p> <p>→ Forschungsoffensive Batterietechnologien → Weiterentwicklung EU-Batterierichtlinie → Weltweites Recyclingsystem für Lithium-Ionen-Batterien</p>	
<p>Verbesserung von Umwelt- und Sozialbedingungen der Förderung</p> <p>→ Globale Industriellianz für nachhaltiges Lithium → Verpflichtende unternehmerische Sorgfaltspflichten (<i>Due Diligence</i>) für Kobalt → Internationale Kooperation nachhaltiger Bergbau</p>	
Eigene Darstellung	

Übersicht der strategischen Handlungsempfehlungen					Tabelle 6.1
Handlungsempfehlung	Start der Initiative	Umsetzung bis	Ebene	Handlungsakteur*	Nationaler Initiator
Globale Industrieallianz für nachhaltiges Lithium	2018	~ 2025	global	Schlüsselakteure aus der Industrie, globale Automobilhersteller	Schlüsselakteure aus der Industrie
Verpflichtende unternehmerische Sorgfaltspflichten (Due Dilligence) für Kobalt	2018	~ 2025	EU	Europäische Kommission, Unternehmen in der Wertschöpfungskette Kobalt	Bundesregierung (BMWi)
Internationale Kooperation nachhaltiger Bergbau	2018	2020–2026	D, EU, global	BMZ, EU, Weltbank, Bergbauunternehmen	Bundesregierung (BMZ)
Weiterentwicklung EU-Batterierichtlinie	2018	~ 2020	EU	Europäische Kommission	Bundesregierung (BMUB)
Weltweites Recyclingssystem für Lithium-Ionen-Batterien	2018	~ 2025–2030	D, EU, global	Europäische Kommission, G7, G20, OECD, UN, Automobil- und Recycling-unternehmen	Bundesregierung mit Industrie-akteuren
Forschungsoffensive Batterietechnologien	fortlaufend		D, EU	Bundesregierung, EU, Technologie-unternehmen	Bundesregierung (BMBF, BMUB, BMWi)
Rohstoffradar Elektromobilität	2019	fortlaufend	D, EU, global	Bundesregierung, EU, UN	Bundesregierung (BMUB, BMWi, BMBF)

* Handlungsakteur = An wen richtet sich die Handlungsempfehlung? Wer sollte diese initiieren?

zu negativen ökologischen und sozialen Folgen führen kann, zugleich aber die Chance bietet, die damit verbundenen Prozesse verträglicher und auch effizienter zu gestalten. Ziel der globalen Industrieinitiative ist es, die Lithiumversorgung für den stark wachsenden Elektromobilitätssektor sicherzustellen – unter umwelt- und sozialverträglichen Bedingungen.

Zu diesem Zweck sollte eine globale Initiative zum Einsatz von nachhaltig gewonnenem Primärlithium ins Leben gerufen werden. Da die Elektromobilität schon in wenigen Jahren aller Voraussicht nach den höchsten Anteil an der globalen Lithiumnachfrage generieren wird, kommt der Automobilbranche, Herstellern und Zulieferern sowie deren Verbänden, hier eine Schlüssel-

rolle für eine Industrieallianz zu. Weitere Mitglieder dieser Allianz wären relevante Bergbauunternehmen im Bereich Lithium, Zulieferer wie Batteriehersteller, Kathodenmaterialhersteller, Zwischenhändler und auch Recyclingunternehmen. Darüber hinaus müssten lokale Stakeholder in den Primärförderländern in den Prozess integriert werden. Schlüsselakteure aus der deutschen Industrie sollten diese Initiative zu nachhaltigem Lithium unterstützen und sie durch Einbindung weiterer Akteure auf nationaler und internationaler Ebene voranbringen.

Nachhaltiges Lithium wird nach weltweit akzeptierten ökologischen und sozialen Standards gewonnen. Die Details zu den konkreten Standards, den einzelnen Kriterien und Grenzwerten für nachhaltiges Lithium sind

in der Industrieinitiative gemeinsam mit unabhängigen Experten zu entwickeln. Dabei sind auch Anforderungen an die Transparenz in der gesamten Wertschöpfungskette für nachhaltig gewonnenes Lithium zu berücksichtigen. Die wichtigsten Effekte einer derartigen Initiative sind vor allen Dingen in den Hauptförderländern von Lithium (derzeit Chile, Argentinien, Australien, USA etc.) sowie in den Ländern mit den Hauptverarbeitungs-kapazitäten (derzeit China, Südkorea, USA etc.) zu erzielen.

Ansatzpunkte für nachhaltig gewonnene Primärrohstoffe liefert zum Beispiel der von der *Initiative for Responsible Mining Assurance* (IRMA) Standard, der derzeit in einem umfassenden Multi-Stakeholder-Prozess (unter anderem mit Nichtregierungsorganisationen und internationalen Bergbauunternehmen) entwickelt wird (IRMA 2017).

Da davon auszugehen ist, dass der Bedarf nach Lithium in den nächsten Jahren rasch und deutlich steigen wird, wird empfohlen erste Gespräche für den Aufbau einer solchen Industrieallianz möglichst zeitnah in 2018 zu starten. Ziel ist, diese globale Initiative bis Mitte des kommenden Jahrzehnts zu etablieren.²⁹

6.2. Verpflichtende unternehmerische Sorgfaltspflichten (Due Dilligence) für Kobalt

Darüber hinaus wird empfohlen, verbindlich unternehmerische Sorgfaltspflichten (*Due Diligence*³⁰) entlang der Handelsketten für Kobalt einzuführen, mit dem Ziel, Umwelt-, Gesundheits- und Sozialrisiken zu minimieren. Die Analyse des zu erwartenden Rohstoffbedarfs für die Elektromobilität macht deutlich, dass der Bedarf an Kobalt steigen wird. Eine nachhaltige Rohstoffversorgung hängt dabei auch zukünftig stark von der Demokratischen Republik Kongo als Hauptförderland ab. Das stellt die primäre Rohstoffgewinnung vor zunehmende

Herausforderungen in Bezug auf bestehende Umwelt- und vor allem Sozialkonflikte, die es in der rohstoffreichen Demokratischen Republik Kongo auch bei anderen Mineralien gibt.

Die Förderung von Konfliktmineralien im Osten der Demokratischen Republik Kongo wird mit Menschenrechtsverletzungen und der Finanzierung bewaffneter Gruppen in Zusammenhang gebracht. In diesem Kontext wurde im *Dodd-Frank Act* festgelegt, dass börsennotierte amerikanische Unternehmen entlang ihrer Lieferkette eine verbindliche Berichts- und Sorgfaltspflicht beim Import von Konfliktmineralien (Zinn, Wolfram, Tantal und Gold) aus der DR Kongo und ihren Nachbarstaaten haben. Infolge des *Dodd-Frank Acts* wurde eine Reihe von Initiativen und Zertifizierungsmechanismen ins Leben gerufen, die zu einer Verbesserung der Standards führten. Ferner kam es zu einem Preisverfall bei nicht zertifizierten Konfliktmineralien, was darauf hindeutet, dass eine Konfliktfinanzierung zunehmend schwieriger geworden ist (Schüler et al. 2016).

Kobalt ist selbst nicht als Konfliktmineral nach dem *Dodd-Frank Act* eingestuft. Der hohe Anteil des Kleinbergbaus in der Kobaltgewinnung in der DR Kongo, der derzeit bei etwa 20 Prozent liegt, birgt jedoch Umwelt- und Sozialrisiken (Al Barazi 2017). Aufgrund ähnlicher Rahmenbedingungen bei der Förderung von Kobalt ist die Einführung von Sorgfaltspflichten entlang der Lieferkette, angelegt an die Mechanismen bei den Konfliktmineralien, ein wichtiger Schritt zur Minimierung bestehender Konflikte sowie zur deren zukünftiger Vermeidung

Unternehmen, die sich engagieren, um einen nachhaltigen und transparenten Abbau von Kobalt zu fördern, dürfen dadurch keine kompetitiven Nachteile haben. Die verpflichtende Einführung einer Sorgfaltspflicht entlang der Lieferkette ist ein adäquates Mittel, um Nachhaltigkeitsstandards im Sektor zu etablieren und Risiken transparent zu machen. Im Mai 2017 hat die EU eine neue Verordnung zu Konfliktmineralien erlassen, die nach einer Übergangsphase ab dem 1. Januar 2021 in Kraft tritt (Europäische Kommission 2017). Die Mitgliedstaaten müssen die zuständigen nationalen Behörden für diese Verordnung festlegen. Ferner bezieht sich die EU auf das von der OECD entwickelte Framework *Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains from*

29 Die Ausweitung dieser Initiative für Lithium auf weitere Rohstoffe, wie beispielsweise Nickel und Grafit, sollte künftig in Betracht gezogen werden.

30 Unter *Due Diligence* wird in diesem Kontext eine Sorgfaltspflicht der Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette hinsichtlich sozialer und ökologischer Gesichtspunkte verstanden.

Conflict-Affected and High-Risk Areas, welches sich zwar auf die Konfliktminerale bezieht, aber die Möglichkeit der Anwendung auf andere Rohstoffe explizit hervorhebt (OECD 2016). Eine Ausweitung dieser Verordnung auf den Rohstoff Kobalt ist aufgrund der beschriebenen Ähnlichkeit zu den Konfliktmineralien notwendig. Weiterhin sollten Umweltaspekte bei Zertifizierungssystemen zusätzlich Berücksichtigung finden.

Mögliche Verschiebungseffekte zu Anbietern aus anderen Ländern (aufgrund steigender Kosten durch die Implementierung von Sorgfaltspflichten) sind auf Basis des heutigen Wissensstandes unwahrscheinlich, da sich die Hälfte aller Kobaltreserven im Kongo befindet. Bei stark steigender Nachfrage ist dementsprechend nur bedingt ein Ausweichen auf andere Länder möglich. Parallel muss dafür Sorge getragen werden, dass wegen größerer Hürden bei der Zertifizierung für Kleinbergleute entsprechende Unterstützungsmaßnahmen vorgesehen werden, die den weiteren Marktzugang der Kleinbergleute sicherstellt.

Mit den OECD *Due Diligence Guidelines* liegt bereits ein funktionierendes und etabliertes System zum Erreichen transparenter Lieferketten vor, weiterhin unterstreicht der Erlass der Konfliktrohstoff-Verordnung eine grundlegende Bereitschaft, transparente Lieferketten auf europäischer Ebene zu etablieren. Daher sollte die verpflichtende Implementierung einer Sorgfaltspflicht entlang der Lieferkette bei Kobalt, mit der Europäischen Kommission als Hauptakteur, in einem kurz- bis mittelfristigen Zeitraum eingeführt werden. Eine Ausweitung der bestehenden Verordnung sollte 2018 gestartet und so schnell wie möglich umgesetzt werden, um ein Inkrafttreten in der ersten Hälfte des kommenden Jahrzehnts zu erreichen. In Deutschland ist die Bundesregierung der Hauptakteur, der einen solchen Vorstoß in die EU-Diskussionen einbringen kann.³¹

31 Langfristig sollten verpflichtende unternehmerische Sorgfaltspflichten ausgeweitet werden auf alle Rohstoffe mit ähnlichen Problemlagen. Die Anwendung von auf Konfliktmineralien ist ein erster Schritt, die Anwendung für Kobalt mit Schwerpunkt DR Kongo wäre der nächste Schritt.

6.3. Internationale Kooperation nachhaltiger Bergbau

Zusätzlich zu den genannten Handlungsfeldern wird eine verstärkte Internationale Kooperation zwischen Import- und Produktionsländern empfohlen, mit dem Ziel den Technologie- und Wissenstransfers für einen nachhaltigen industriellen Bergbau und artisanalen Kleinbergbau zu fördern.

Der Grundstein eines verantwortlichen sowie umwelt- und sozialverträglichen Bergbaus wird in den Ländern gelegt, in denen die Primärrohstoffförderung stattfindet. Die Etablierung verantwortlicher Standards muss über einen aktiven Technologie- und Wissenstransfer daher vor Ort gefördert werden. Die lokale Kompetenzbildung zum Beispiel in afrikanischen Primärförderländern wird aktiv in der *Africa Mining Vision* adressiert, sodass durch eine verstärkte Internationale Zusammenarbeit in diesem Bereich eine Win-win-Situation für Abbau- und Importländer (umwelt- und sozialverträgliche Standards in den Abbauländern verbunden mit ökonomischer Perspektive, sicherer und konfliktfreier Versorgung der Importländer mit Rohstoffen) entstehen kann (African Union 2009).

Ein Beispiel bei der Etablierung verantwortungsvoller Standards im Kleinbergbau ist der Ansatz der Certified Trading Chains von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Kooperation mit dem kongolesischen Bergbauministerium. Das Projekt auditiert einige Dutzend Zinn-, Tantal-, Wolfram- und Goldminen in der Demokratischen Republik Kongo mit dem Ziel, die Transparenz, die Arbeitsbedingungen, die Sicherheit, die Entwicklung der lokalen Gemeinden sowie die Umweltauswirkungen der Betriebe zu verbessern und einen Marktzugang für die Kleinbergleute zu gewährleisten.

Ansatzpunkte für die entsprechende Ausweitung der Internationalen Kooperation gibt es auf nationaler Ebene in Deutschland bereits mit drei bilateralen Rohstoffpartnerschaften (initiiert durch die Bundesregierung) mit Kasachstan, der Mongolei und Peru.³² Darüber hinaus

32 Diese Rohstoffpartnerschaften zielen darauf ab, die Rohstoffversorgung deutscher Unternehmen langfristig zu verbessern und rohstoffreiche Länder beim Aufbau ihres

existieren Projekte der technischen Zusammenarbeit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im Auftrag des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), zum Beispiel in der Mongolei, in Vietnam, Laos, Ruanda und Myanmar zur Unterstützung der lokalen Bergaufsicht.

Mittel- und langfristig ist es wichtig, dass Geberorganisationen in der Entwicklungszusammenarbeit verstärkt Projekte unterstützen, die auf einen aktiven und langfristig wirksamen Wissensaustausch zwischen den relevanten Stakeholdern in Produktions- und Importländern abzielen. Die aktuellen EU-Indikativprogramme der Europäischen Kommission (GD DEVCO)³³, in denen die Strategien, Ziele und Schwerpunkte der Entwicklungszusammenarbeit definiert werden, betreffen den Zeitraum von 2014 bis 2020. In den jetzigen Indikativprogrammen wird die primäre Rohstoffförderung nur sehr begrenzt adressiert und betrifft vor allem die finanzielle Transparenz von Bergbauunternehmen – ein Schwerpunkt ist insbesondere die Unterstützung von Ländern beim Beitritt zur *Extractive Industries Transparency Initiative* (EITI). Die nächsten Indikativ-Programme sollten um Projekte im Bereich des Wissenstransfers und der internationalen Kooperation zum nachhaltigen Bergbau ergänzt werden.

Die EU-Kommission (GD DEVCO) sollte entsprechende Inhalte in den nächsten beiden Jahren angehen, sodass sie in die Indikativprogrammen 2020 bis 2026 Eingang finden. Andere Geberinstitutionen sollten sich in ihren Projekten ebenfalls verstärkt dem Wissenstransfer im Bergbau zuwenden, beispielsweise durch Schulung der geologischen Dienste in ressourcenreichen Ländern. Das BMZ sollte darauf hinarbeiten, dass die Rohstoffpartner-

Rohstoffsektors zu unterstützen. Über die Sicherung von Rohstoffen hinaus sollte diese Art der Zusammenarbeit noch stärker genutzt werden, um vereinbarungsgemäß Fachkräfte vor Ort zu qualifizieren, die Umwelt-, Arbeits- und Sozialstandards zu verbessern sowie die technische Infrastruktur zu optimieren und damit insgesamt zu einem nachhaltigeren Bergbau beizutragen. Für eine erfolgreiche Partnerschaft sollte außerdem die Zivilgesellschaft in den Partnerländern künftig stärker in die Prozesse eingebunden werden.

33 Generaldirektion Internationale Zusammenarbeit und Entwicklung der Europäischen Kommission

schaften um die genannten Aspekte erweitert werden, und die Bundesregierung sollte ihren Einfluss geltend machen, damit die EU-Programme die oben beschriebenen Inhalte aufnehmen.

6.4. Weiterentwicklung EU-Batterierichtlinie

Während die ersten drei Empfehlungen im Wesentlichen die Primärförderung adressieren, zielt die Empfehlung zur Weiterentwicklung der europäischen Batterierichtlinie im Hinblick auf Lithium-Ionen-Antriebsbatterien auf deren Recycling und damit auf die umweltverträgliche Rückgewinnung ihrer strategischen Rohstoffe.

Die aktuell gültige Batterierichtlinie betrifft Traktionsbatterien für die Elektromobilität und deren strategische Rohstoffe (Lithium, Kobalt, Nickel, Grafit) nicht adäquat. Derzeit findet die Ex-post-Evaluierung der europäischen Batterierichtlinie statt.³⁴ Es wird praktisch von allen Beteiligten davon ausgegangen, dass eine Anpassung der europäischen Batterierichtlinie an aktuelle Entwicklungen der Elektromobilität notwendig ist und im weiteren Laufe des Jahres 2018 weiter vorbereitet wird. Dieser Prozess sollte so schnell wie möglich vorangetrieben werden. Vor dem Hintergrund entsprechend erforderlicher Abstimmungen und Übergangsfristen ist nach dem heutigen Stand mit einer Umsetzung und damit effektiven Wirkung einer solchen Anpassung nicht vor dem Jahr 2020 zu rechnen.

Noch werden Lithium-Ionen-Antriebsbatterien unter Industriebatterien (*industrial batteries*) und hier in den Bereich der sonstigen Batterien (*other batteries*) subsummiert. Da die Lithium-Ionen-Antriebsbatterien in Zukunft in großem Umfang in den Markt treten werden, sollten sie in der überarbeiteten Batterierichtlinie separat und mit einem eigenen ambitionierten Sammel- und Recyclingziel ausgewiesen werden. Diese Ziele sollten differenziert nach den strategisch bedeutenden Rohstoffen (Lithium, Kobalt, Nickel, Grafit) formuliert werden, um deren Rückgewinnung und Wiederverwendung sichern zu können. Insbesondere für Lithium ist ein

34 Ein Bericht hierzu wird voraussichtlich im ersten Quartal 2018 vorgelegt werden.

eigenes Recyclingziel notwendig und sinnvoll, da ein Recycling von Lithium bislang nur in Ansätzen durchgeführt wird. Bei der Formulierung von Recyclingquoten in der aktuellen Batterierichtlinie (von 50 Prozent ohne Unterscheidung nach einzelnen Rohstoffen) kann das gesetzte Ziel auch ohne Rückgewinnung der wichtigen Rohstoffe erreicht werden. Die konkreten rohstoff-spezifischen Recyclingziele sind nach Konsultation mit Experten insbesondere aus der Recyclingbranche, festzulegen. Die Weiterentwicklung der Richtlinie sollte auf Basis eines *Impact Assessments* zu den erreichbaren Umweltentlastungen bei Rohstoffen, zu den Kosteneffekten und potenziellen Wechselwirkungen mit dem Markthochlauf der Elektromobilität und zu den resultierenden Treibhausgaswirkungen erfolgen.

Zuständig für die Überarbeitung der Batterierichtlinie ist die Europäische Kommission im Zusammenspiel mit Ministerrat und dem Europäischen Parlament. Die Bundesregierung sollte sich bei der Europäischen Kommission und im zuständigen Ministerrat nach Maßgabe der Ergebnisse eines *Impact Assessments* für die Einführung von rohstoffspezifischen Recyclingzielen in der Batterierichtlinie einsetzen. Auch können Auswirkungen der derzeit diskutierten Wiederverwendung von Antriebsbatterien als stationäre Energiespeicher auf die Herstellerverantwortung analysiert werden. Die Vorbereitungen zur Überarbeitung der Batterierichtlinie auf europäischer Ebene haben bereits begonnen. Dies bedeutet, dass die Empfehlungen für eine Weiterentwicklung der Batterierichtlinie bereits 2018 zu konkretisieren und einzubringen sind.

6.5. Weltweites Recyclingsystem für Lithium-Ionen-Batterien

Zusätzlich zur Weiterentwicklung des europäischen Regulierungsrahmens wird der Aufbau einer global umfassenden Recyclingstruktur für Lithium-Ionen-Batterien empfohlen. Dies ist zwingend erforderlich, um die Altbatterien optimal zu erfassen und die relevanten Rohstoffe der Lithium-Ionen-Batterien gezielt zurückgewinnen zu können.

Um den Mengenbedarf des Markthochlaufs der Elektromobilität nach Lithium aus der Primärproduktion zu dämpfen, wurden im Rahmen der Studie Anteile für

den Einsatz von Sekundärlithium im Jahr 2030 von 10 Prozent und im Jahr 2050 von 40 Prozent, angesetzt. Um diese Quoten zu erreichen, ist die Einführung einer umfassenden Recyclingstruktur für Lithium-Ionen-Batterien unabdingbar. Besondere Bedeutung kommt dabei innovativen Anreizsystemen und Geschäftsmodellen für die Erfassung (zum Beispiel Pfandsysteme oder Leasing), für eine flächendeckende Recyclingstruktur für Lithium-Ionen-Batterien mit Sammel- und Transportsystem sowie für das Recycling der wichtigsten Rohstoffe (vor allem Lithium, Kobalt, Nickel, Grafit) zu. Die Anforderungen an die Struktur eines Sammel-systems sollten zeitnah (in den nächsten drei Jahren) formuliert werden, um notwendige Richtlinien rechtzeitig vor den zu erwartenden, schnell wachsenden Rückläufen von *End-of-Life*-Antriebsbatterien anpassen zu können. Hohe Sammelquoten der Lithium-Ionen-Batterien aus der Elektromobilität sind bei adäquaten Sammelstrukturen durchaus realistisch, wie bereits die sehr hohen Sammelquoten für herkömmliche Blei-Säure-Batterien zeigen. Eine flächendeckende Umsetzung eines weltweiten Recyclingsystems ist aufbauend auf der Sammelstruktur für Lithium-Ionen-Batterien bis 2030 zu erreichen. In den Hauptmärkten der Elektromobilität wie China, Europa, Nordamerika sollte die Sammel- und Recyclinginfrastruktur bereits bis Mitte des nächsten Jahrzehnts aufgebaut sein.

In Europa sollte die Weiterentwicklung der Batterierichtlinie in den nächsten Jahren einen bedeutenden Impuls für den Aufbau einer Sammel- und Recyclingstruktur (siehe Handlungsempfehlung „Weiterentwicklung EU-Batterierichtlinie“) geben. Zuständig sind die Europäische Kommission auf der EU-Ebene sowie die einzelnen Mitgliedsstaaten selbst. Für eine globale Umsetzung sind Organisationen wie OECD, G7, G20 sowie die UN (Regeln zum Gefahrguttransport) wichtige Akteure. Weiterhin sind industrielle Stakeholder wie die Automobilindustrie, Batteriehersteller und die Recyclingunternehmen selbst entscheidend für einen Erfolg des globalen Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien. Die Bundesregierung sollte den Aufbau einer globalen Recyclingstruktur für Lithium-Ionen-Batterien gemeinsam mit relevanten Industrieakteuren aktiv vorantreiben.

Für die EU ist eine umfassende Recyclingstruktur der Rohstoffe von zusätzlicher Bedeutung, um die Rohstoff-

anbieter zu diversifizieren und die Abhängigkeit von Primärförderländern zu reduzieren. Ein Recycling führt ebenso zu einer Preisdämpfung, wie man am Rohstoff Platin bereits sehen kann.

6.6. Forschungsoffensive Batterie-technologien

Zur weitergehenden Dämpfung der Nachfrage nach Rohstoffen aus der Primärförderung zur Förderung einer sicheren und nachhaltigen Rohstoffversorgung für die Elektromobilität wird darüber hinaus eine umfassende Offensive zur weiteren Forschung und Entwicklung empfohlen. Diese sollte den Bereich der Traktionsbatterien für die Elektromobilität hinsichtlich der Weiterentwicklung der Materialeffizienz, der Substitutionsalternativen, der optimierten Erfassung, der automatisierten Demontage sowie der Recyclingtechnologien selbst abdecken. Zusätzlich sollte weitere Forschung und Entwicklung im Bereich effizienter und nachhaltiger Gewinnung von Primärmaterialien für die Elektromobilität unterstützt werden. Die Anstrengungen im Bereich der Forschung und Entwicklung (F&E) sind dabei explizit auf die relevanten Rohstoffe auszurichten.

In den letzten Jahren wurden bereits deutsche Forschungs- und Entwicklungsprojekte in diesen Bereichen, wie zum Beispiel BMUB-Recyclingprojekte zu Lithium-Ionen-Batterien (LiBRi³⁵, LithoRec³⁶, EcoBatRec³⁷ etc.) oder UBA-Substitutionsprojekte (zum Beispiel SubSKrit³⁸), durchgeführt. Diese F&E-Projekte haben zum

Beispiel beim Recycling von Lithium-Ionen-Batterien wichtige Erkenntnisse geliefert und industrielle Aktivitäten in diesem Bereich angestoßen. Trotzdem sind kurz-, mittel- und langfristig weitere Anstrengungen in Forschung und Entwicklung notwendig, speziell mit dem Fokus auf das Recycling hochreiner Lithiumverbindungen (mit Batteriequalität). Um technologisches Know-how im Bereich Batterietechnik in Deutschland zu erhalten und Technologiesprünge voranzubringen, ist es von strategischer Relevanz, dass Forschungsprojekte von der Bundesregierung weiterhin angestoßen werden.

Auch in Europa laufen F&E-Anstrengungen zu Materialeffizienz, Substitution und Recycling. Hier sei als Beispiel das Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission genannt, das unter anderem zur Substitution seltener Rohstoffe in Traktionsbatterien forscht. Der Bereich des nachhaltigen Bergbaus wird zum Beispiel speziell im Horizon2020-Projekt STRADE³⁹ adressiert. Weitere F&E-Anstrengungen sollten fortlaufend national wie auch in internationaler Zusammenarbeit (binationale und transnationale Programme) verfolgt werden mit dem Fokus auf den relevanten Rohstoffen Lithium, Kobalt, Nickel und Grafit in Lithium-Ionen-Batterien. Relevante Technologieunternehmen in Deutschland und Europa stehen ebenfalls in besonderer Verantwortung, durch umfassende Aktivitäten im Bereich F&E zu Fortschritten beizutragen.

6.7. Rohstoffradar Elektromobilität

Die Marktentwicklung der Elektromobilität entwickelt sich aktuell hochdynamisch. Damit korreliert auch die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Antriebsbatterien und den darin enthaltenen kritischen Rohstoffen. Um die Strategien und Maßnahmen zur nachhaltigen Rohstoffversorgung der Elektromobilität diesen Entwicklungen zukünftig anpassen zu können, wird ein regelmäßiges Monitoring der Annahmen zur weltweiten Entwicklung der Elektromobilität, der Auswirkungen auf den Rohstoffbedarf und der Umsetzung der beschriebenen Handlungsempfehlungen vorgeschlagen.

Die Szenarien dieser Studie zu zukünftigen Rohstoff-

35 „Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – Lithium-Ionen Batterierecycling Initiative – LiBRi“ (Abschlussbericht abrufbar unter erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-libri_1.pdf)

36 „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – LithoRec II“ (Abschlussbericht abrufbar unter www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/Abschlussbericht_LithoRec_II_20170116.pdf)

37 „Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ion-Batterien der Elektromobilität“ (Projektwebseite: www.ecobatrec.de/index.html)

38 „Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien. Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen (SubSKrit)“

39 „Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe“ (Projektwebseite: stradeproject.eu/index.php?id=3)

bedarfen beruhen auf aktuellen Fahrzeugszenarien (IEA 2016 a) und Expertenannahmen hinsichtlich der eingesetzten Batterietechnologie und der entsprechenden Rohstoffe. Es deutet sich bereits heute an, dass die Annahmen der IEA aus dem Jahr 2016 (Zwei-Grad-Ziel-Szenario) im Bereich Elektromobilität durchaus durch neue Szenarien bezüglich der schnelleren Entwicklung der Elektrifizierung des Verkehrssektors abgelöst werden könnten. Daher sollte die Bundesregierung ein kontinuierliches Monitoring hinsichtlich der Elektromobilitätsentwicklung und deren Auswirkungen initiieren. In diesem Monitoring sollte der Rohstoffbedarf auf Basis aktualisierter Hochrechnungen des globalen Fahrzeugbestandes beziehungsweise der Verkäufe und der erkennbaren Entwicklung der Batterietechnologie aktualisiert und entsprechende Handlungsoptionen formuliert werden. Dieses Monitoring sollte sich nicht nur auf die Bedarfsseite beschränken, sondern auch mögliche temporäre Produktionsengpässe auf der Anbieterseite bei der Erschließung neuer Vorkommen berücksichtigen. Hierzu kann eine regelmäßige Evaluierung von Bergbauprojekten erfolgen, um Prospektionen zur primären Rohstoffproduktion zu ermöglichen.

Ebenso sollten die aktuellen Erkenntnisse über Auswirkungen und Risiken der Primärrohstoffgewinnung der relevanten Rohstoffe adressiert werden. Bislang erreichte Ziele wie zum Beispiel der Einsatz von nachhaltig gewonnenem Rohstoff müssten berücksichtigt werden. Im Rahmen jedes Monitorings wird die Beteiligung der relevanten Stakeholder aus Automobilindustrie, Recyclingunternehmen, Nichtregierungsorganisationen, Ministerien, Zulieferern, Primärproduzenten und Wissenschaft empfohlen, um die Aussagen und darauf aufbauenden Handlungsempfehlungen zu diskutieren und zu validieren. Im Anhang werden die Anwendungsbereiche und Bedarfshochrechnungen der betrachteten Rohstoffe über alle Anwendungen dargestellt. Der Bedarf in der Elektromobilität basiert auf den vorangegangenen Hochrechnungen aus Kapitel 3. Der Bedarf für die weiteren Anwendungen beruht lediglich auf groben Annahmen.

07 | Anhang

Des Weiteren werden im Anhang die Annahmen für die Batteriekapazitäten für die Hochrechnungen tabellarisch aufgezeigt.

7.1. Anwendungsbereiche der relevanten Rohstoffe und Bedarf über alle Anwendungen

Lithium

2016 lag der Lithiumbedarf für die Batterieanwendung mit 39 Prozent erstmals über der Anwendung im Bereich Glas und Keramik (30 Prozent). Weitere Anwendung findet Lithium zum Beispiel in Schmierfetten (8 Prozent) oder der Polymerherstellung (5 Prozent). Die Anwendungsbereiche für Lithium im Jahr 2016 sind in folgender Abbildung dargestellt.

Die Hochrechnung für den gesamten Lithiumbedarf über alle Anwendungen hinweg ist in Abbildung 7.2 visualisiert. Dabei wurde angenommen, dass die übrigen Anwendungen mit Ausnahme der Schmierfette um zwei Prozent pro Jahr (CAGR⁴⁰) steigen. Die Schmierfette werden in der Erdölbohrung eingesetzt, daher wird hier konservativ ein gleichbleibender Bedarf angenommen. In die Hochrechnung sind keine Annahmen über den Einsatz von Sekundärmaterial eingegangen.

Kobalt

Die Anwendung der Batterien macht den größten Kobaltbedarf mit 42 Prozent aus. Weitere Anwendungen sind zum Beispiel Superlegierungen (16 Prozent), Hartmetalle (10 Prozent) oder Magnete (5 Prozent). Die Anwendungen sind in Abbildung 7.3 dargestellt.

Die Hochrechnung für den gesamten Kobaltbedarf über alle Anwendungen hinweg ist in Abbildung 7.4 visualisiert. Dabei wurde angenommen, dass die übrigen Anwendungen um drei Prozent pro Jahr (CAGR⁴⁰) steigen.

In die Hochrechnung sind keine Annahmen über den Einsatz von Sekundärmaterial eingegangen.

Nickel

Die Anwendung von Nickel in Batterien machte 2010 nur einen sehr geringen Bedarfsanteil aus. Sie fällt in der Abbildung über die Anwendungsbereiche von Nickel in den Bereich „Sonstiges“. Der deutlich größte Anwendungsbereich ist Edelstahl (61 Prozent) gefolgt von nickelbasierten Legierungen (12 Prozent). Die Anwendungen sind in Abbildung 7.5 dargestellt.

Die Hochrechnung für den gesamten Nickelbedarf über alle Anwendungen hinweg ist in Abbildung 7.6 visualisiert. Dabei wurde angenommen, dass die übrigen Anwendungen um drei Prozent pro Jahr (CAGR) steigen. In die Hochrechnung sind keine Annahmen über den Einsatz von Sekundärmaterial eingegangen.

Grafit

Die Anwendung von natürlichem Grafit in Batterien machte 2011 nur einen geringen Bedarfsanteil aus. Es fällt in den Anwendungsbereich Kohlebürsten, Batterien mit 20 Prozent. Der größte Anwendungsbereich ist Stahl (26 Prozent). Die Anwendungen sind in Abbildung 7.7 dargestellt.

Die Hochrechnung für den gesamten Grafitbedarf über alle Anwendungen hinweg ist in Abbildung 7.8 visualisiert. Dabei wurde angenommen, dass die übrigen Anwendungen um drei Prozent pro Jahr (CAGR) steigen. In die Hochrechnung sind keine Annahmen über den Einsatz von Sekundärmaterial eingegangen.

40 CAGR = *Compound Annual Growth Rate*, durchschnittliche jährliche Wachstumsrate

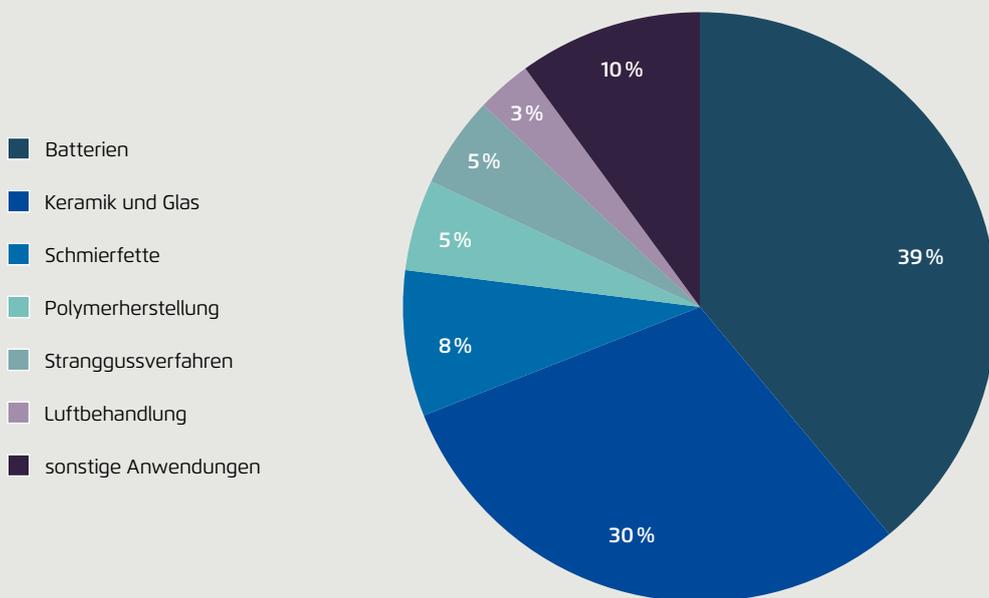
Platin

Die Anwendung von Platin in Autoabgaskatalysatoren war 2013 der größte Anwendungsbereich mit 36 Prozent gefolgt von der Schmuckindustrie mit 35 Prozent. Der Platinbedarf für Brennstoffzellen fällt in der folgenden Grafik zu den Anwendungsbereichen von Platin in den Bereich sonstige Anwendungen. Die Anwendungen sind in Abbildung 7.9 dargestellt.

Die Hochrechnung für den gesamten Platinbedarf über alle Anwendungen hinweg ist in Abbildung 7.10 visualisiert. Dabei wurde angenommen, dass die übrigen Anwendungen um 1,5 Prozent pro Jahr (CAGR) steigen. In die Hochrechnung sind keine Annahmen über den Einsatz von Sekundärmaterial eingegangen.

Anwendungsbereiche Lithium (2016)

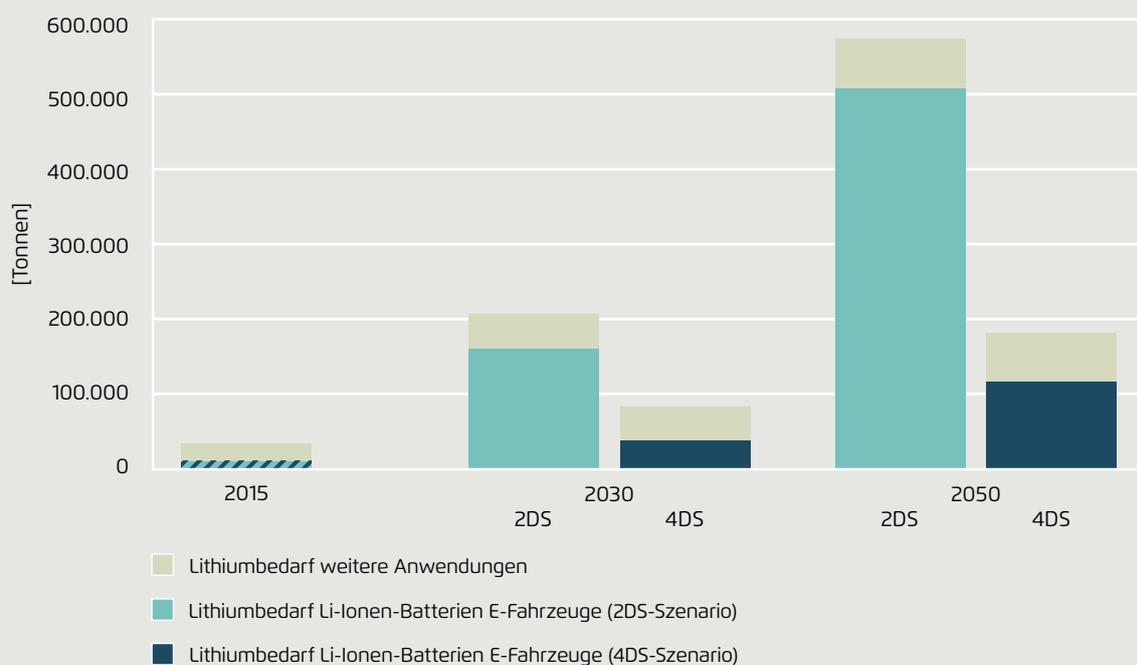
Abbildung 7.1



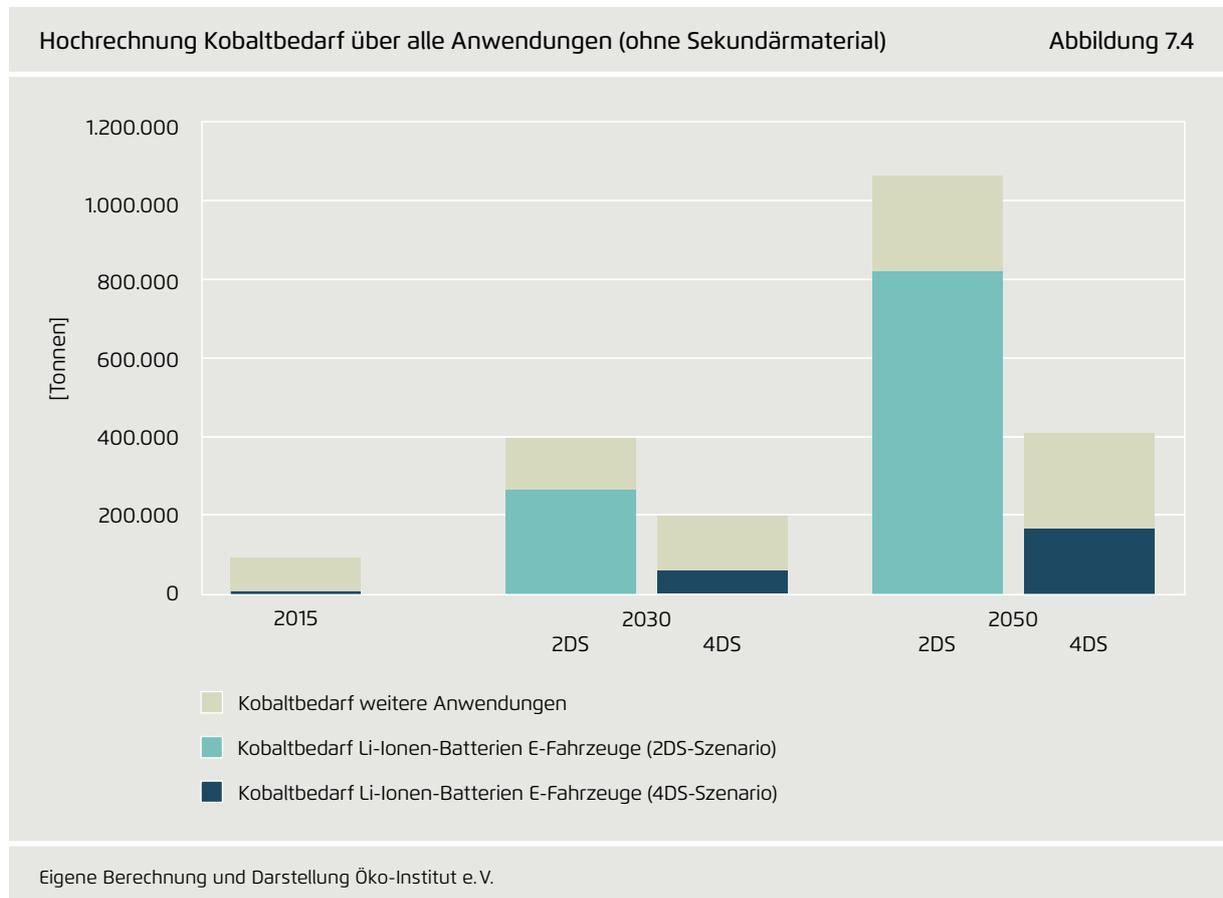
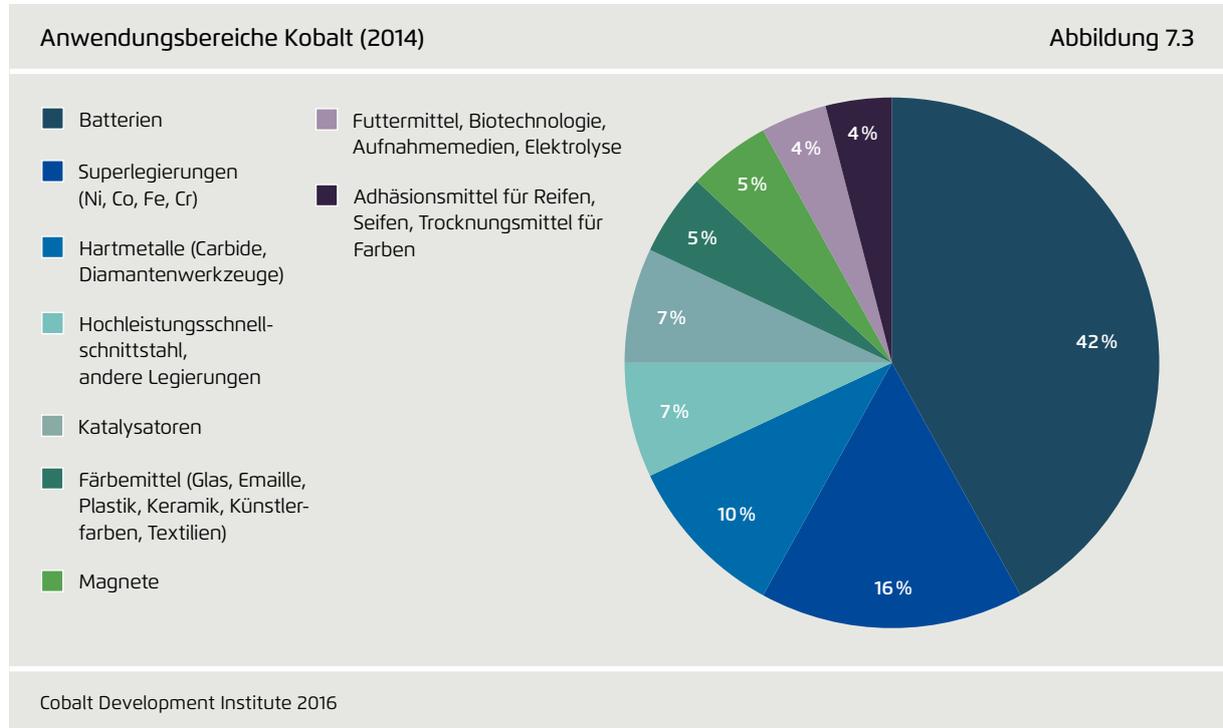
USGS 2017

Hochrechnung Lithiumbedarf über alle Anwendungen (ohne Sekundärmaterial)

Abbildung 7.2

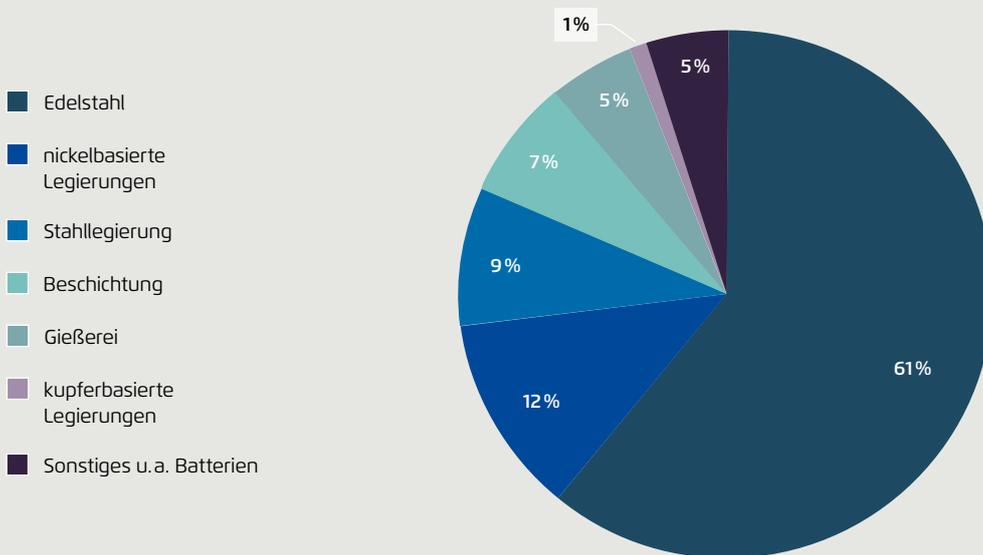


Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V.



Anwendungsbereiche Nickel (2010)

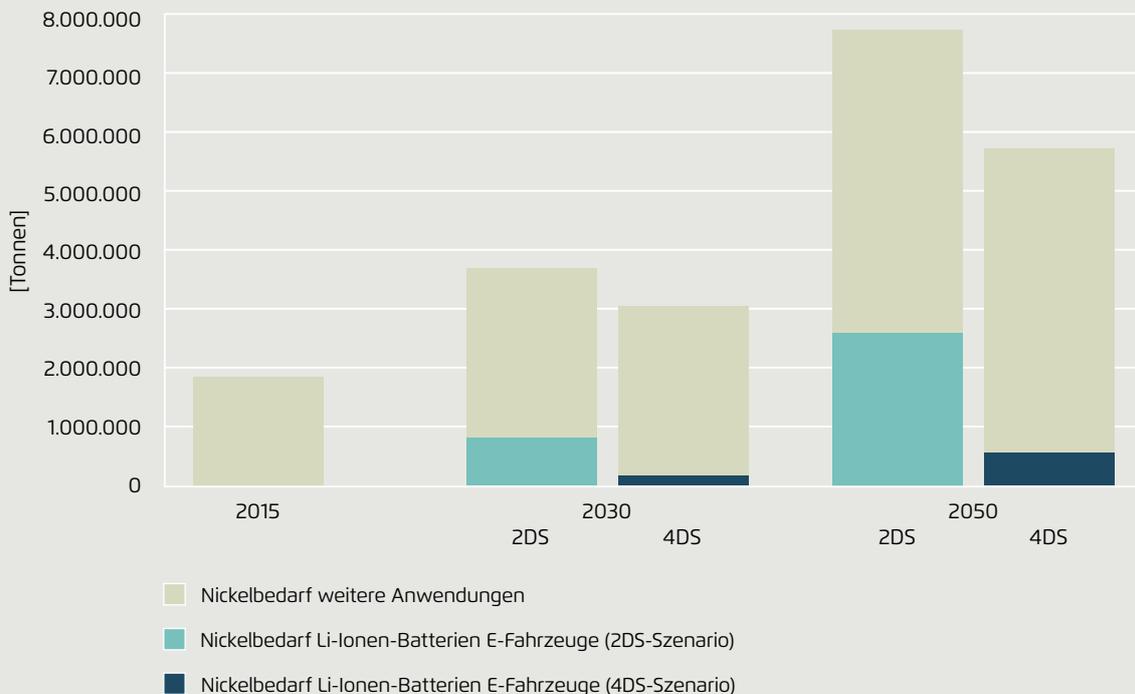
Abbildung 7.5



Europäische Kommission 2014

Hochrechnung Nickelbedarf über alle Anwendungen (ohne Sekundärmaterial)

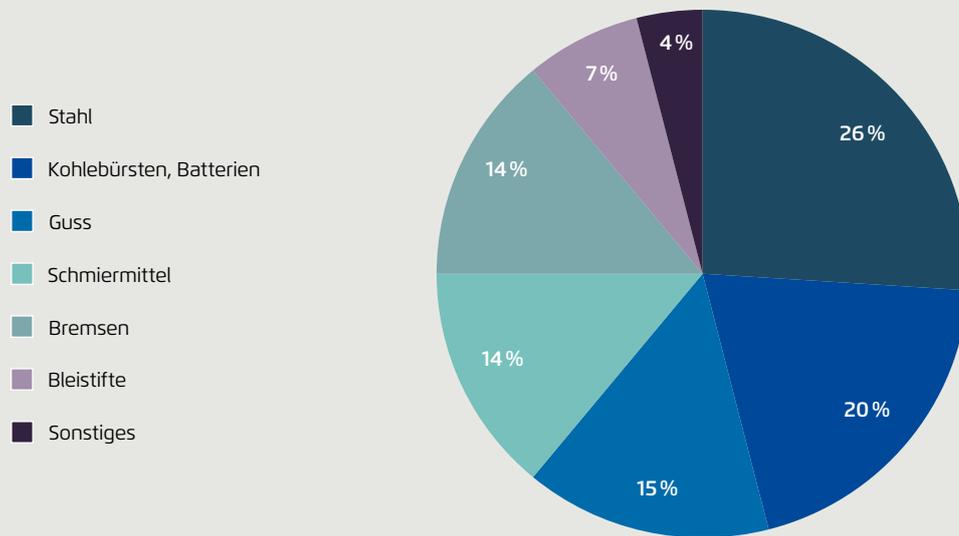
Abbildung 7.6



Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V.

Anwendungsbereiche natürlicher Grafit (2011)

Abbildung 7.7



Statista 2017

Hochrechnung Grafitbedarf über alle Anwendungen (ohne Sekundärmaterial)

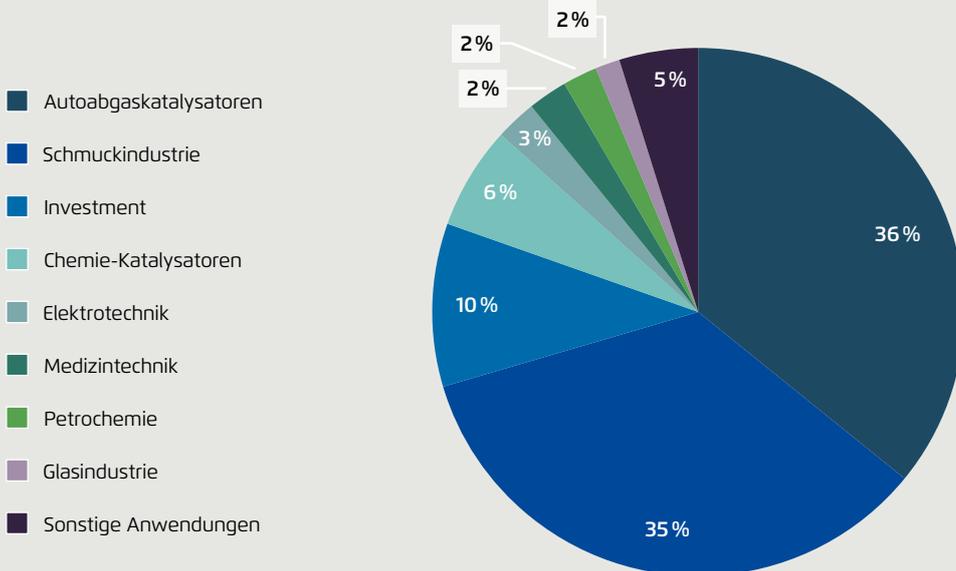
Abbildung 7.8



Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V.

Anwendungsbereiche Platin (2013)

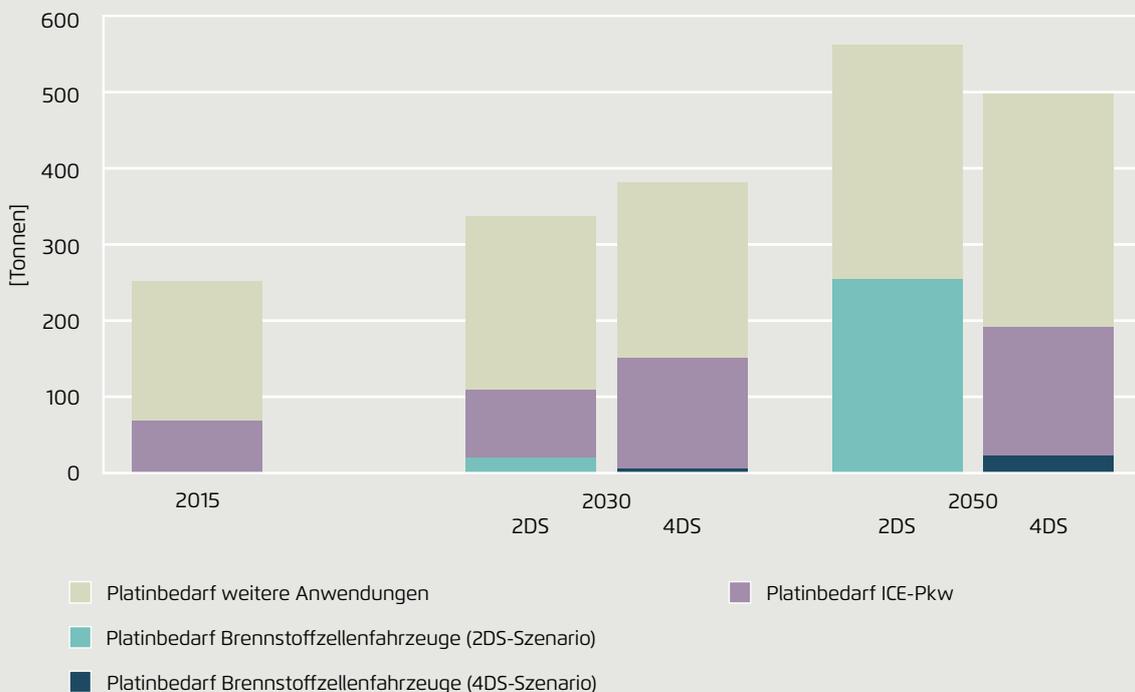
Abbildung 7.9



BGR 2016

Hochrechnung Platinbedarf über alle Anwendungen (ohne Sekundärmaterial)

Abbildung 7.10



Eigene Berechnung und Darstellung Öko-Institut e.V.

7.2. Batteriekapazitäten

Pkws: Angenommene Batterietypen und Leistungen			
Tabelle 7.1			
Pkw	2015	2030	2050
BEV	NMC: 30 kWh (1 : 1 : 1)	NMC: 50 kWh (6 : 2 : 2) (90% Marktanteil in BEV)	NMC: 50 kWh (6 : 2 : 2) (90% Marktanteil in BEV)
	NCA: 80 kWh	NCA: 80 kWh (10% Marktanteil in BEV)	NCA: 80 kWh (10% Marktanteil in BEV)
	LFP: 20 kWh		
HEV	NiMH: 1 kWh	NMC: 1 kWh	NMC: 1 kWh
PHEV	LFP: 10 kWh		
	NMC: 10 kWh	NMC: 10 kWh	NMC: 10 kWh
FCEV	NMC: 2 kWh	NMC: 2 kWh	NMC: 2 kWh
ICE	–	LFP: 0,3 kWh	LFP: 0,3 kWh

Darstellung Öko-Institut e. V.

Busse: Angenommene Batterietypen und Leistungen			
Tabelle 7.2			
Busse	2015	2030	2050
BEV	LFP: 150 kWh	NMC: 250 kWh	NMC: 300 kWh
HEV	LFP: 30 kWh	NMC: 30 kWh	NMC: 30 kWh
PHEV	LFP: 50 kWh	NMC: 50 kWh	NMC: 50 kWh
FCEV	LFP: 20 kWh	NMC: 20 kWh	NMC: 20 kWh

Darstellung Öko-Institut e. V.

Lkw: Angenommene Batterietypen und Leistungen			
Tabelle 7.3			
Lkw	2015	2030	2050
BEV MFT	LFP: 100 kWh	NMC: 100 kWh	NMC: 100 kWh
BEV HFT	LFP: 200kWh	NMC: 200 kWh	NMC: 200 kWh
HEV MFT	LFP: 10 kWh	NMC: 10 kWh	NMC: 10 kWh
HEV HFT	LFP: 20 kWh	NMC: 20 kWh	NMC: 20 kWh
PHEV MFT	LFP: 30 kWh	NMC: 30 kWh	NMC: 30 kWh
PHEV HFT	LFP: 60 kWh	NMC: 60 kWh	NMC: 60 kWh
FCEV MFT	LFP: 10 kWh	NMC: 10 kWh	NMC: 10 kWh
FCEV HFT	LFP: 30 kWh	NMC: 30 kWh	NMC: 30 kWh

MFT = Medium Freight Trucks, HFT = Heavy Freight Trucks
Darstellung Öko-Institut e.V.

Pedelegs, 2- und 3-Wheeler: Angenommene Batterietypen und Leistungen			
Tabelle 7.4			
Pedelegs, 2- und 3-Wheeler	2015	2030	2050
Pedelegs	NCA: 0,24 kWh	NCA: 0,24 kWh	NCA: 0,24 kWh
2- und 3-Wheeler (in China)	LFP: 1,6 kWh (4% der elektrischen 2- und 3-Wheeler mit Lithium-Ionen-Batterien)	NMC: 1,6 kWh (50% der elektrischen 2- und 3-Wheeler mit Lithium-Ionen-Batterien)	NMC: 1,6 kWh (100% mit Lithium-Ionen-Batterien)
2- und 3-Wheeler (Rest der Welt)	LFP: 1,6 kWh (100% der elektrischen 2- und 3-Wheeler mit Lithium-Ionen-Batterien)	NMC: 1,6 kWh (100% der elektrischen 2- und 3-Wheeler mit Lithium-Ionen-Batterien)	NMC: 1,6 kWh (100% der elektrischen 2- und 3-Wheeler mit Lithium-Ionen-Batterien)

Darstellung Öko-Institut e.V.

Literaturverzeichnis

African Union (2009): African Union. *Africa Mining Vision*.

Al Barazi et al. (2017): Al Barazi, Siyamend; Näher, Uwe; Vetter, Sebastian; Schütte, Philip; Liedtke, Maren; Baier, Matthias; Franken, Gudrun. *Kobalt aus der DR Kongo – Potenziale, Risiken und Bedeutung für den Kobaltmarkt*; in: *Commodity Top News* 53 5/2017. BGR, DERA (Hrsg.).

BGR (2016): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. *Platin – Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe*. Hannover.

BGS (2016): British Geological Survey. *British Geological Survey. Lithium*. Keyworth.

Buchert et al. (2011): Buchert, Matthias; Jenseit, Wolfgang; Dittrich, Stefanie; Hacker, Florian; Schüler-Hainsch, Eckhard; Ruhland, Klaus; Knöfel, Sven; Goldmann, Daniel; Rasenack, Kai; Treffer, Frank. *Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Anhang zum Schlussbericht im Rahmen der Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*. Öko-Institut e.V., Daimler AG, TU Clausthal, Umicore (Hrsg.). Darmstadt.

Chetty (2016): Chetty, Rajendra. *The Marikana Massacre. Insurgency and Counter-Insurgency in South Africa*; in: *New Labor Forum* 25(2), S. 62 – 70.

Cobalt Development Institute (2016): Cobalt Development Institute. *Cobalt facts „Cobalt Supply & Demand 2015“*.

Degreif et al. (2017): Degreif, Stefanie; Buchert, Matthias; Bulach, Winfried; Behrendt, Siegfried; Müller, Felix.: *Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien*.

DERA (2017): Deutsche Rohstoffagentur. *Volatilitätsmonitor August 2016 – Juli 2017*.

Europäische Kommission (2014): Europäische Kommission. *Report on Critical Raw Materials for the EU. Non-critical raw material profiles*.

Europäische Kommission (2017): Europäische Kommission. *Combating Conflict Minerals*. URL: <http://ec.europa.eu/trade/policy/in-focus/conflict-mineralsregulation/>. Letzter Zugriff am: 09.06.2017.

Evans (2014): Evans, Keith. *Lithium*; in: Gus Gunn (Hrsg.), *Critical Metals Handbook*. Keyworth.

FOE (2013): Friends of the Earth Europe. *Lithium*. URL: www.foeeurope.org/sites/default/files/publications/13_factsheetlithium-gb.pdf. Letzter Zugriff am: 19.05.2017.

Green Car Congress (2016): Green Car Congress. *Honda begins production of motor free of heavy rare earth elements*. URL: www.greencarcongress.com/2016/08/20160824-honda.html. Letzter Zugriff am: 13.09.2017.

Grosjeana et al. (2012): Grosjeana, Camille; Herrera Mirandaa, Pamela; Perrina, Marion; Poggib, Philippe. *Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry*; in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(3), S. 1735 – 1744.

Gunn (2014): Gunn, Gus. *Platinum-group metals*; in: Gus Gunn (Hrsg.), *Critical Metals Handbook*. Keyworth.

Hagelüken; Buchert (2008): Hagelüken, Christian; Buchert, Matthias. *The mine above ground – opportunities & challenges to recover scarce and valuable metals from EoL electronic devices*. Vortrag auf dem International Electronic Recycling Congress in Salzburg, 17.01.2008.

IEA (2016 a): International Energy Agency. *Energy Technology Perspectives*.

IEA (2016 b): International Energy Agency. *Global EV Outlook 2016. Beyond one million electric cars*.

IEA (2017): International Energy Agency. *Global EV Outlook 2017. Two million and counting*.

International Mining (2017): International Mining. *Successful testing of direct lithium and potassium extraction from brines*. URL: <http://im-mining.com/2017/06/05/successful-testing-direct-lithium-potassium-extractionbrines/>. Letzter Zugriff am: 08.08.2017.

IRMA (2017): Initiative for Responsible Mining Assurance. *The IRMA Standard for Responsible Mining*. URL: www.responsiblemining.net/irma-standard.
Letzter Zugriff am: 12.09.2017.

Jamerson; Benjamin (2015): Jamerson, Frank E.; Benjamin, Ed. *Electric Bikes Worldwide Reports*. Light Electric Vehicles /EV Technology – 2015 Twelfth Edition.

Nicolson (2015): Nicolson, Greg. *Marikana: 'I don't see any difference' in living conditions*. In: Daily Maverick. URL: www.dailymaverick.co.za/article/2015-08-18-marikana-i-dont-see-any-difference-in-living-conditions/.
Letzter Zugriff am: 28.08.2017.

Mudd (2010): Mudd, Gavin M. *Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites*; in: *Ore Geology Reviews* 38 (1 – 2). S. 9 – 26.

OECD (2016): Organization for Economic Co-operation and Development. *OECD Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas. Third Edition*. OECD Publishing. Paris.

Pillot (2017): Pillot, Christophe. „Lithium ion battery raw material supply & demand 2016 – 2025“. Vortrag auf der aabc Europe in Mainz, 30.01.2017.

Posco (2017): Posco. *POSCO begins lithium production first time in Korea*. URL: www.posco.com/homepage/docs/eng5/jsp/prcenter/news/s91c1010025v.jsp?idx=2701&onPage=1.
Letzter Zugriff am: 15.5.2017.

Pozo-Antonio et al. (2014): Pozo-Antonio, Santiago; Puente-Luna, Iván; Lagüela-López, Susana; Veiga-Ríos, María. *Techniques to correct and prevent acid mine drainage*. A review; in: *DYNA* 81 (186), S. 73 – 80.

Pure Energy Minerals (2017): Pure Energy Minerals. *21st century Lithium*; in: *Benchmark Q2 Review 2017*, S. 27 – 33.

Rüttinger; Griestop (2015): Rüttinger, Lukas; Griestop, Laura. *Dodd-Frank Act*. UmSoResS Steckbrief. adelphi (Hrsg.). Berlin.

Schmidt (2015): Schmidt, Michael. *Rohstoffrisikobewertung – Platingruppenmetalle*. DERA Rohstoffinformationen 26. Berlin.

Schnurpfeil (2015): Schnurpfeil, Katharina. *Südafrika sucht Stromerzeuger*; in: ExportManager. URL: www.exportmanager-online.de/2015/ausgabe-6-2015/suedafrika-sucht-stromerzeuger/.
Letzter Zugriff am: 23.05.2017.

Schüler et al. (2011): Schüler, Doris; Buchert, Matthias; Liu, Ran; Dittrich, Stefanie; Merz, Cornelia. *Study on rare earths and their recycling. Final Report for The Greens/ EFA Group in the European Parliament*.

Schüler, Schleicher, et al. (2016): Schüler, Doris; Schleicher, Tobias; Jenseit, Wolfgang; Degreif, Stefanie; Buchert, Matthias; Pavel, Claudiu C.; Marmier, Alain; Alves Dias, Patricia; Blagoeva, Darina; Evangelos, Tzimas. *Substitution of critical raw materials in low-carbon technologies: lighting, wind turbines and electric vehicles*. Europäische Kommission (Hrsg.).

Schüler, Brunn, et al. (2016): Schüler, Doris; Brunn, Christoph; Gsell, Martin; Manhart, Andreas. *Outlining Socio-Economic Challenges in the Non-Fuel Mining Sector*. Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe (STRADE).

Statista (2017): Statista. *Distribution of natural graphite usage worldwide in 2011*. URL: www.statista.com/statistics/452259/share-of-use-of-natural-graphiteworldwide/.
Letzter Zugriff am: 08.08.2017.

Swiss Resource Capital (2016): Swiss Resource Capital AG. *Lithium Report 2016*.

UBA (2016): Umweltbundesamt. *Ableitung von Recycling- und Umweltaanforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken bei innovativen Energiespeichern*.

Umicore (2017): Persönliches Interview mit Mitarbeitern der Umicore AG & Co. KG am 17.05.2017 in Hanau (Herr Dr. Hagelüken, Herr Dr. Spurk, Herr Dr. Zuber).

UNEP (2011): United Nations Environment Programme. *Recycling Rates of Metals. A Status Report*. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel.

USGS (2007): United States Geological Survey. *Mineral Commodity Summaries 2007*.

USGS (2017): United States Geological Survey. *Mineral Commodity Summaries 2017*.

Whoriskey (2016): Whoriskey, Peter. *In Your Phone, in Their Air*. in: Washington Post. URL: www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/graphitemining-pollution-in-china/. Letzter Zugriff am: 23.05.2017.

Yager et al. (2013): Yager, Thomas R.; Soto-Viruet, Yadira; Barry, James J. *Recent Strikes in South Africa's Platinum-Group Metal Mines—Effects Upon World Platinum-Group Metal Supplies*. USGS (Hrsg.).

Yeh et al. (2016): Yeh, Sonia; Mishra, Gouri Shankar; Fulton, Lew; Kyle, Page; McCollum, David L.; Miller, Joshua; Cazzola, Pierpaolo, Teter, Jacob. *Detailed assessment of global transport-energy models' structures and projections*; in: Transportation Research Part D: Transport and Environment 55, S. 294 – 309.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Jährliche Verkäufe (links) und Bestand (rechts) von Pkws nach dem 2DS-Szenario (Millionen Fahrzeuge)

Abbildung 2.2: Globale Verteilung der Pkw-Verkäufe im Jahr 2030 nach dem 2DS-Szenario

Abbildung 2.3: Globale Verteilung der Pkw-Verkäufe im Jahr 2050 nach dem 2DS-Szenario

Abbildung 2.4: Jährliche Verkäufe (links) und Bestand (rechts) von Lkws nach dem 2DS-Szenario (Millionen Fahrzeuge)

Abbildung 2.5: Jährliche Verkäufe von Bussen nach dem 2DS-Szenario (links) und dem 4DS-Szenario (rechts) (Millionen Fahrzeuge)

Abbildung 2.6: Jährliche Verkäufe (links) und Bestand (rechts) von Krafträdern nach dem 2DS-Szenario (Millionen Fahrzeuge)

Abbildung 2.7: Jährliche Verkäufe von Pedelecs nach dem 2DS-Szenario (links) und dem 4DS-Szenario (rechts) (Millionen Fahrzeuge)

Abbildung 2.8: Jährliche Verkäufe aller elektrischen Fahrzeuge (PHEV, BEV, FCEV) nach Typ, absolut (oben) und prozentual (unten) nach 2DS-Szenario

Abbildung 3.1: Globaler Lithiumbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS und Sekundärmaterialpotenziale (in Tonnen)

Abbildung 3.2: Lithiumbedarf in den Elektromobilitätsanwendungen im 2DS-Szenario in den Jahren 2030 und 2050

Abbildung 3.3: Globaler Kobaltbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS und Sekundärmaterialpotenziale (in Tonnen)

Abbildung 3.4: Kobaltbedarf in den Elektromobilitätsanwendungen im 2DS-Szenario in den Jahren 2030 und 2050

Abbildung 3.5: Globaler Nickelbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS und Sekundärmaterialpotenziale (in Tonnen)

Abbildung 3.6: Nickelbedarf in den Elektromobilitätsanwendungen im 2DS-Szenario in den Jahren 2030 und 2050

Abbildung 3.7: Globaler Graphitbedarf in Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS (in Tonnen)

Abbildung 3.8: Graphitbedarf in den Elektromobilitätsanwendungen im 2DS-Szenario in 2030 und 2050

Abbildung 3.9: Globaler Platinbedarf in Brennstoffzellen und Autoabgaskatalysatoren für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS (in Tonnen); (ohne Sekundärmaterial)

Abbildung 3.10: Platinbedarf in den Elektromobilitätsanwendungen im 2DS-Szenario in den Jahren 2030 und 2050

Abbildung 3.11: Globaler Platinbedarf in Brennstoffzellen und Autoabgaskatalysatoren für Fahrzeuge 2015, 2030, 2050 in den Szenarien 2DS und 4DS (in Tonnen); (mit Annahmen von Sekundärmaterialeinsatz)

Abbildung 4.1: Globale Minenproduktion Lithium 2016 (in Prozent der Förderländer)

Abbildung 4.2: Globale Reserven Lithium 2016 (nach Staaten in Prozent)

Abbildung 4.3: Globale Minenproduktion Kobalt 2016 (in Prozent der Förderländer)

Abbildung 4.4: Globale Reserven Kobalt 2016 (nach Staaten in Prozent)

Abbildung 4.5: Globale Minenproduktion Nickel 2016 (in Prozent der Förderländer)

Abbildung 4.6: Globale Reserven Nickel 2016 (nach Staaten in Prozent)

Tabellenverzeichnis

Abbildung 4.7: Aufteilung der Rohstoffkosten (Durchschnitt August 2016 bis Juli 2017, nur wesentliche Zellmaterialien) einer BEV-Pkw-(NMC-1:1:1-)Batterie

Abbildung 4.8: Anteile der Rohstoffkosten der wesentlichen Zellmaterialien bei einer 30-Kilowattstunden-Pkw-BEV-(NMC-)Batterie bei variablen Gesamtbatteriekosten

Abbildung 4.9: Globale bergbauliche Lithiumproduktion 2015 und Reserven

Abbildung 4.10: Globale bergbauliche Kobaltproduktion 2015 und Reserven

Abbildung 6.1: Lösungsstrategien und Handlungsempfehlungen

Abbildung 7.1: Anwendungsbereiche Lithium (2016)

Abbildung 7.2: Hochrechnung Lithiumbedarf über alle Anwendungen (ohne Sekundärmaterial)

Abbildung 7.3: Anwendungsbereiche Kobalt (2014)

Abbildung 7.4: Hochrechnung Kobaltbedarf über alle Anwendungen (ohne Sekundärmaterial)

Abbildung 7.5: Anwendungsbereiche Nickel (2010)

Abbildung 7.6: Hochrechnung Nickelbedarf über alle Anwendungen (ohne Sekundärmaterial)

Abbildung 7.7: Anwendungsbereiche natürlicher Grafit (2011)

Abbildung 7.8: Hochrechnung Grafitbedarf über alle Anwendungen (ohne Sekundärmaterial)

Abbildung 7.9: Anwendungsbereiche Platin (2013)

Abbildung 7.10: Hochrechnung Platinbedarf über alle Anwendungen (ohne Sekundärmaterial)

Tabelle 2.1: In der vorliegenden Arbeit unterschiedene Antriebsarten für Fahrzeuge

Tabelle 2.2: Jährliche Verkaufszahlen Pkws nach Antrieb und Szenario (Millionen Fahrzeuge)

Tabelle 4.1: Rohstoffpreise der wesentlichen Zellmaterialien für eine NMC-Batterie in Dollar je Kilogramm

Tabelle 4.2: Rohstoffkosten der wesentlichen Zellmaterialien einer NMC-Batterie (30 kWh, NMC 1:1:1) in Dollar/Batterie

Tabelle 6.1: Übersicht der strategischen Handlungsempfehlungen

Tabelle 7.1: Pkws: Angenommene Batterietypen und Leistungen

Tabelle 7.2: Busse: Angenommene Batterietypen und Leistungen

Tabelle 7.3: Lkws: Angenommene Batterietypen und Leistungen

Tabelle 7.4: Pedelecs, 2- und 3-Wheeler: Angenommene Batterietypen und Leistungen

Agora Verkehrswende hat zum Ziel, gemeinsam mit Akteuren aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft die Grundlagen dafür zu schaffen, dass der Verkehrssektor in Deutschland bis 2050 dekarbonisiert werden kann. Hierfür erarbeiten wir Klimaschutzstrategien und unterstützen deren Umsetzung.

Agora Verkehrswende

Anna-Louisa-Karsch-Str. 2 | 10178 Berlin

T +49 (0)30 700 14 35-000

F +49 (0)30 700 14 35-129

www.agora-verkehrswende.de

info@agora-verkehrswende.de

