

An aerial photograph of a large open-pit mine. The mine is characterized by its terraced, stepped levels, which are colored in various shades of blue, green, and brown, likely due to different mineral deposits or weathering. A winding road with a few vehicles is visible on the right side of the image. The overall scene is a vast, industrial landscape.

Rohstoffe für innovative Fahrzeugtechnologien

Herausforderungen und Lösungsansätze

Rohstoffe für innovative Fahrzeugtechnologien

Herausforderungen und Lösungsansätze

Herausgeber



Autoren



thinkstep

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	6	4.6	Kupfer	50
Management Summary	8	4.6.1	Bereitstellung	50
1 Motivation und Hintergrund der Studie	14	4.6.2	Verwendung	52
2 Vorgehen und Aufbau der Studie	18	4.7	Fazit	52
2.1 Kritikalitätsuntersuchung	20	5 Weltweite Entwicklung von Abbau und Reserven	54	
2.2 Rolle der Experteninterviews für die Studie	21	5.1	Einführung grundlegender Begriffe und Konzepte	56
3 Relevante Technologien und Rohstoffe	22	5.2	Lithium	59
3.1 Auswahl der relevanten Technologien	24	5.3	Kobalt	61
3.2 Beschreibung der geeigneten Technologien und der notwendigen Rohstoffe	25	5.4	Nickel	63
3.3 Kritikalitätsuntersuchung und Identifikation der für die Anwendungen kritischen Rohstoffe	29	5.5	Platin	67
3.3.1 Die Kritikalitätsbetrachtung im Rahmen dieser Studie	29	5.6	Seltenerdmetalle	69
3.3.2 Ergebnisse für das Versorgungsrisiko	31	5.7	Kupfer	71
3.3.3 Ergebnisse für die Folgeschwere	33	5.8	Fazit	71
3.3.4 Darstellung der Ergebnisse und Identifikation der für die Anwendungen kritischen Rohstoffe ...	34	6 Preise und Kosten	72	
3.3.5 Vergleich der Ergebnisse mit anderen Kritikalitätsuntersuchungen	35	6.1	Lithium	74
4 Bereitstellung und Verwendung der als kritisch identifizierten Rohstoffe	38	6.1.1	Historische Preisentwicklung	74
4.1 Lithium	40	6.1.2	Aktuelle Preisentwicklung	74
4.1.1 Bereitstellung	40	6.1.3	Beiträge zu den Kosten	76
4.1.2 Verwendung	42	6.1.4	Betrachtung von Angebot und Nachfrage	77
4.2 Kobalt	42	6.2	Kobalt	78
4.2.1 Bereitstellung	42	6.2.1	Historische Preisentwicklung	78
4.2.2 Verwendung	44	6.2.2	Aktuelle Preisentwicklung	79
4.3 Nickel	44	6.2.3	Beiträge zu den Kosten	80
4.3.1 Bereitstellung	44	6.2.4	Betrachtung von Angebot und Nachfrage	80
4.3.2 Verwendung	46	6.3	Nickel	81
4.4 Platin	46	6.3.1	Historische Preisentwicklung	81
4.4.1 Bereitstellung	46	6.3.2	Aktuelle Preisentwicklung	81
4.4.2 Verwendung	48	6.3.3	Beiträge zu den Kosten	83
4.5 Seltenerdmetalle	49	6.3.4	Betrachtung von Angebot und Nachfrage	83
4.5.1 Bereitstellung	49	6.4	Platin und Platingruppenmetalle	84
4.5.2 Verwendung	50	6.4.1	Historische Preisentwicklung von PGM	84
		6.4.2	Historische Preisentwicklung von Platin	84
		6.4.3	Aktuelle Preisentwicklung	85

6.4.4	Beiträge zu den Kosten	86
6.4.5	Betrachtung von Angebot und Nachfrage	86
6.5	Seltenerdmetalle	87
6.5.1	Historische Preisentwicklung	87
6.5.2	Aktuelle Preisentwicklung der Seltenerdmetalle Neodym und Dysprosium	88
6.5.3	Beiträge zu den Kosten	89
6.5.4	Betrachtung von Angebot und Nachfrage	89
6.6	Kupfer	90
6.6.1	Historische Preisentwicklung	90
6.6.2	Aktuelle Preisentwicklung	90
6.6.3	Beiträge zu den Kosten	91
6.6.4	Betrachtung von Angebot und Nachfrage	91
6.7	Fazit	92
7	Ökologische Betrachtung der Rohstoffbereitstellung	94
7.1	Kurze Einführung zu den betrachteten Größen	96
7.2	Lithium	98
7.3	Kobalt	98
7.4	Nickel	99
7.5	Platin	100
7.6	Seltenerdmetalle	101
7.7	Kupfer	102
7.8	Fazit	103
8	Recycling	104
8.1	Erwartung hinsichtlich des Recyclings (Experteninterviews)	106
8.2	Betrachtung heutiger Recyclingquoten	106
8.3	Optimales Recycling	108
8.4	Recycling der kritischen Rohstoffe aus Batterien	109
8.5	Recycling von Platin aus Brennstoffzellen	112
8.6	Recyclingsituation für Seltenerdmetalle	114
8.7	Recyclingsituation für Kupfer aus Kabeln und Elektromotoren	115
8.8	Fazit	116

9	Ethische Aspekte	118
9.1	Lithium	121
9.2	Kobalt	122
9.3	Nickel	125
9.4	Platin	126
9.5	Seltenerdmetalle	128
9.6	Kupfer	130
9.7	Initiativen verschiedener Interessenvertreter	132
9.8	Zusammenfassung	135
9.9	Fazit	137
10	Betrachtungen auf Fahrzeugebene	138
10.1	Materialbedarf pro Fahrzeug	140
10.2	Betrachtung von Kosten und ökologischen Aspekten	142
10.3	Rohstoffnachfrage durch BEV und FCEV	144
10.4	Fazit	147
11	Handlungsempfehlungen und Fazit	148
	Literaturverzeichnis	154
	Abbildungsverzeichnis	167
	Tabellenverzeichnis	169
	Abkürzungsverzeichnis	170
	Anhang – Experteninterviews	172

Vorwort



Unser Verkehrs- und Mobilitätssystem befindet sich in einer tiefgreifenden Umbruchphase. Um den vereinbarten Klimaschutzziele nachzukommen, gilt es, die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor bis 2030 um 55 % gegenüber 1990 zu senken. Elektromobilität ist einer der entscheidenden Hebel, um diese Ziele zu erreichen. Batterieelektrische und brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge sind Schlüsselanwendungen, um klimafreundliche Mobilität zu verwirklichen.

Gleichzeitig bedingen auch technische, rechtliche und gesellschaftliche Veränderungen einen tiefgreifenden Strukturwandel in unserem Mobilitätssystem. Wir erleben eine zweite Welle der Digitalisierung mit dem Trend zu Vernetzung, autonomen Systemen, digitalen Technologieplattformen, neuen Geschäftsmodellen und Dienstleistungen. Wertschöpfungsstrukturen und Materialvorketten verändern sich: eine Herausforderung für etablierte Firmen, aber auch eine große Chance, gleichzeitig Umwelt- und Lebensqualität weltweit zu verbessern.

Das Land Baden-Württemberg mit seiner starken Automobilindustrie kann hier verantwortungsvoll vorangehen und die Gestaltungsmöglichkeiten ergreifen, um das Wertschöpfungspotenzial und die Arbeitsplätze der Menschen im Land zu sichern. Jetzt werden die strategischen Weichen gestellt, wie Elektromobilität erfolgreich industrialisiert werden kann und dabei dem Anspruch der Nachhaltigkeit in seinen drei Dimensionen – ökologisch, ökonomisch und sozial – gerecht wird.

Insbesondere die Frage, ob die für die Elektromobilität notwendigen Rohstoffe in ausreichender Menge zur Verfügung stehen, wird intensiv diskutiert. Denn egal, ob in der Brennstoffzelle oder in der Batterie, es werden immer Rohstoffe mit begrenzter Verfügbarkeit benötigt. Baden-Württemberg hat den Anspruch, die gesamte Wertschöpfungskette neuer Mobilitätslösungen abzubilden. Daher hat die Landesagentur e-mobil BW eine vergleichende Analyse des Rohstoffbedarfs von batterieelektrischen und brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen in Auftrag gegeben. Ein besonderes Augenmerk liegt auf den, beim Abbau verursachten Treibhausgasemissionen, der Kritikalität der Rohstoffe, der Einhaltung ethischer Standards und vor allem der globalen Verfügbarkeit von Reserven.

Es ist uns ein Anliegen, mit dieser Studie wichtige Informationen und Fakten zur Verfügung zu stellen, um die Rohstoffproblematik umfassend zu beleuchten und Lösungsstrategien aufzuzeigen. Denn die Frage der Sicherung von Rohstoffverfügbarkeiten, der Steigerung der Ressourceneffizienz und nachhaltiger Materialvorketten sind entscheidende Faktoren, damit der Markthochlauf der Elektromobilität gelingen und Baden-Württemberg im weltweiten Wettbewerb bestehen kann.

Franz Loogen, Geschäftsführer
e-mobil BW GmbH

Management Summary

Inhalt und Ziel der Studie

Die vorliegende Studie beleuchtet das komplexe Themenfeld rund um die Rohstoffe, die für Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (BEV und FCEV) erforderlich sind. Zu den zahlreichen relevanten Aspekten gehören unter anderem die Herkunft und weitere Verwendungsmöglichkeiten dieser Rohstoffe, ihre verfügbaren Mengen und Abbauraten, Preise und Kosten, das Recycling der Rohstoffe sowie diverse ökologische und ethische Aspekte, die im Zusammenhang mit der Rohstoffbereitstellung stehen.

Ziel dieser Studie ist es, relevante Informationen und wichtige Hintergründe einem breiten Zielpublikum zu vermitteln sowie die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen aufzuzeigen. Der Fokus liegt dabei sowohl auf den Materialien als auch auf ihrem Einsatz im Rahmen der entsprechenden Fahrzeugtechnologien.

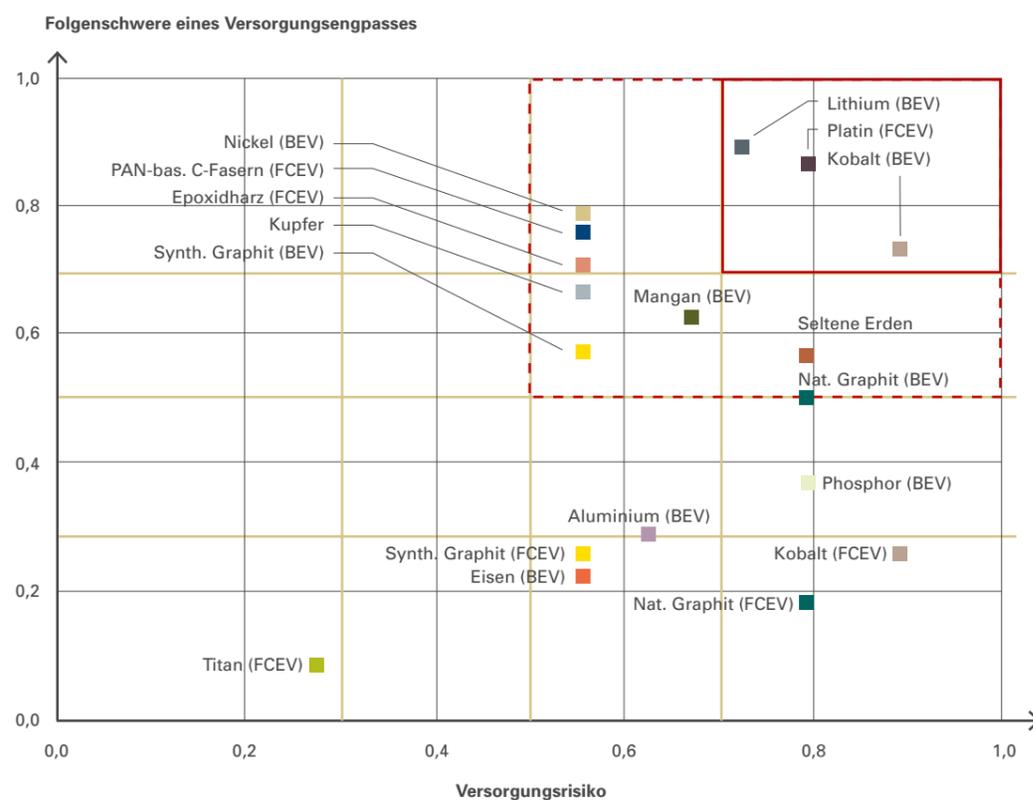


Abbildung 0-1: Ergebnisdarstellung der Kritikalitätsanalyse von Rohstoffen für Batterie- (BEV) und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV)

Schritt 1: Identifikation relevanter Rohstoffe

Auf Basis einer Expertenbefragung wurden Lithium-Ionen-Batterien mit unterschiedlichen Kathodenmaterialien, Brennstoffzellen mit Protonenaustauschmembran (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC) sowie H₂-Druckspeichertanks neben Permanentmagneten aus Seltenerdmetallen für die Elektromotoren sowie neben kupferbasierten Kabelbäumen als relevante Technologien für Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge identifiziert. Die darin enthaltenen Rohstoffe wurden im Rahmen einer Kritikalitätsbewertung hinsichtlich des **Versorgungsrisikos** und der **Folgenschwere** eines möglichen **Versorgungsengpases** bewertet. Während zur Quantifizierung des Versorgungsrisikos Indikatoren nach der Richtlinie gemäß VDI 4800 verwendet wurden, dienten Experteneinschätzungen als Ausgangsbasis zur Quantifizierung der Folgenschwere für die Nutzung der Materialien in den beiden Fahrzeugtypen.

Als Ergebnis dieser Kritikalitätsbetrachtung wurden **Lithium, Kobalt und Platin** als besonders kritisch für die genannten Anwendungen identifiziert. Des Weiteren wurden auch Nickel, die Seltenerdmetalle und Kupfer aufgrund ihrer zu erwartenden Bedeutung für Elektrofahrzeuge der nachfolgenden detaillierten Analyse unterzogen.

Schritt 2: detaillierte Betrachtung der Rohstoffe

Die genannten Rohstoffe wurden einer detaillierten und umfassenden Analyse unterzogen, in der folgende Aspekte betrachtet wurden:

- die Herkunftsländer der Rohstoffe und monopolistische Länderkonzentrationen bei der Förderung
- die Verwendung der Rohstoffe in verschiedenen Produkten und Sektoren
- die Entwicklung von Förderung und Reserven der Rohstoffe seit 1995
- die Entwicklung der Marktpreise seit 1995
- die Entwicklung der Marktpreise in der jüngeren Vergangenheit (seit 2016)
- Kostenbeiträge bei der Rohstoffförderung

- Prognose von Angebot und Nachfrage in der näheren Zukunft (bis 2025 bzw. 2030) und mögliche Konsequenzen für die Preisentwicklung
- der Primärenergiebedarf zur Förderung der Rohstoffe
- die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) durch die Förderung der Rohstoffe
- die theoretischen Treibhausgasemissionen durch die Förderung der Rohstoffe unter der Annahme, dass ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt würde
- die heutigen Recyclingquoten der Rohstoffe
- das zukünftige Recycling von Rohstoffen aus Batterien, Brennstoffzellen, Permanentmagneten aus Elektromotoren und Kupferkabeln
- ethische Aspekte in Verbindung mit der Rohstoffbereitstellung
- Initiativen zur Verbesserung der Bedingungen bei der Rohstoffbereitstellung

Bei Betrachtung der Rohstoffherkunftsländer stechen besonders die Demokratische Republik (DR) Kongo (ca. 60 % der weltweiten Kobaltförderung), Südafrika (> 70 % der weltweiten Platinförderung) und China (> 80 % der weltweiten Förderung von Seltenerdmetallen) hervor. Lithium wird zu 43 % in Australien, zu 33 % in Chile und zu 11 % in Argentinien gewonnen.

Besonders interessant ist die Tatsache, dass nicht nur der **Abbau** aller betrachteten sechs Rohstoffe im Zeitraum von 1995 bis 2015 gestiegen ist, sondern ebenso deren ausgewiesene **Reserven**, also die heute wirtschaftlich abbaubare Rohstoffmenge. Dies ist besonders ausgeprägt für Lithium und Kobalt: Die Förderung dieser beiden Rohstoffe erhöhte sich in besagtem Zeitraum auf das Doppelte bzw. das Sechsfache. Gleichzeitig stiegen ihre Reserven auf das Siebenfache (Lithium) bzw. das Doppelte (Kobalt).

Die Preisentwicklung aller Rohstoffe zeigt ein stark volatiles Verhalten. So ist es keine Seltenheit, dass Preise sich innerhalb eines Jahres auf das Doppelte erhöhen, wie in der jüngeren Vergangenheit beispielsweise für Lithium und Kobalt,



© Denis Zhirkh/istock

oder auch in gleichem Maße fallen. Auch die längerfristige Preisentwicklung seit 1995 weist für Nickel, Platingruppenmetalle, Seltenerdmetalle und Kupfer erhebliche Spitzen auf.

Der Primärenergiebedarf und die verursachten Treibhausgasemissionen weisen für die Bereitstellung von einem Kilogramm der betrachteten Materialien starke Unterschiede auf. Diese korrelieren mit der Konzentration des Zielmaterials im jeweiligen Erz. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass auch die für unterschiedliche Fahrzeugtypen notwendigen Mengen stark voneinander abweichen. Ein entsprechender Vergleich auf Fahrzeugebene erfolgt in Schritt 3 der Studie.

Bereits heute existieren technische Ansätze für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Diese fokussieren sich allerdings häufig auf die Wiedergewinnung von Kobalt, Nickel und Kupfer sowie auf Massenmetalle und Elektronikbauteile. Zunehmend wird jedoch auch Lithium wiedergewonnen. Auch zur Rückgewinnung von Platin aus Brennstoffzellen existieren verschiedene Ansätze, so dass in Zukunft mit hohen Rückgewinnungsraten aus Brennstoffzellen gerechnet werden kann. Ebenso existieren verschiedene Ansätze von der Wiederverwendung ganzer Permanentmagneten bis hin zur Rückgewin-

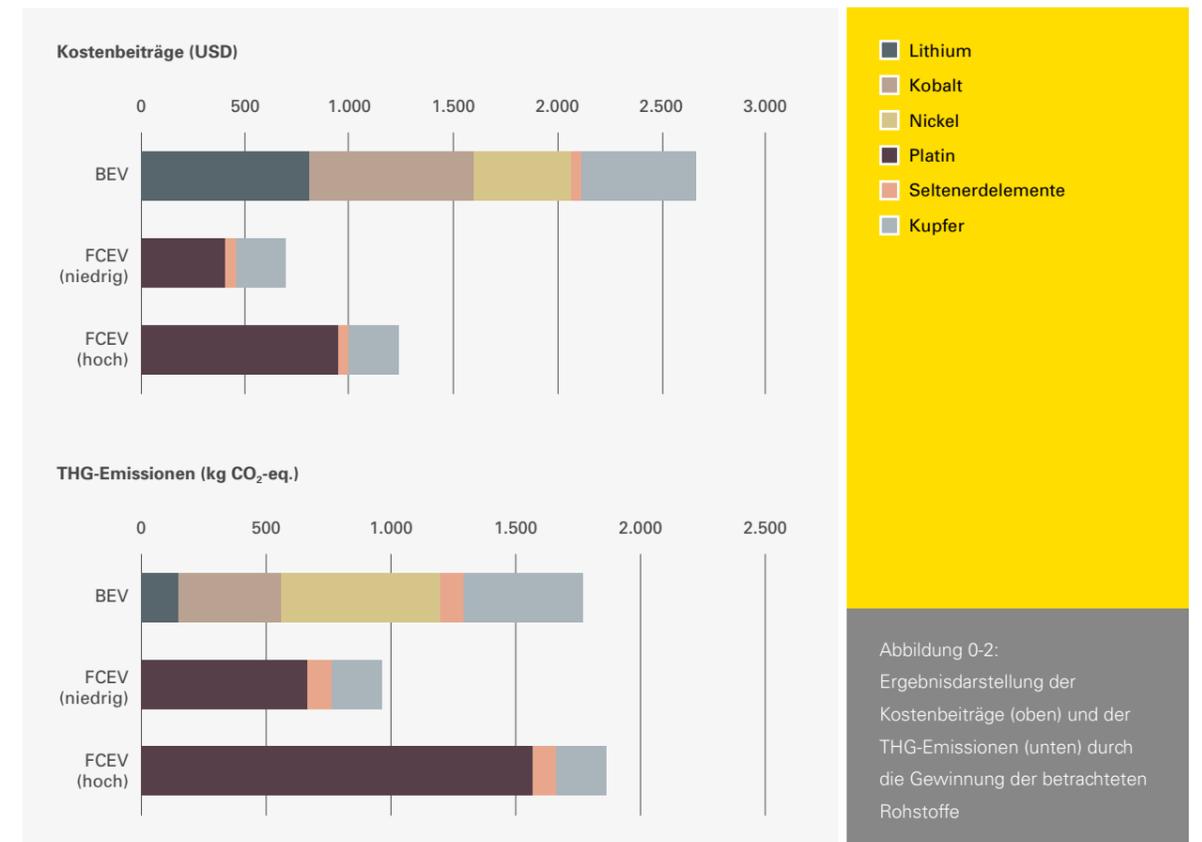
nung der einzelnen darin enthaltenen Rohstoffe. Diese werden jedoch aktuell noch nicht in großem Maße genutzt. Kupfer stellt ein positives Beispiel mit einem etablierten Wiedergewinnungssystem dar, auch wenn hier die Erträge und Effizienzen noch gesteigert werden können, um die Materialverluste zu minimieren. Große Unsicherheit geht generell von der Frage aus, wie viele der Fahrzeuge am Lebensende dem Recycling zur Verfügung stehen werden bzw. welcher Anteil diesem beispielsweise durch Exporte entzogen wird.

Im Rahmen der Recherche konnten für alle Rohstoffe Anhaltspunkte für bedenkliche **ethische Aspekte** ermittelt werden. Diese stechen für Kobalt, dessen wichtigstes Förderland die DR Kongo darstellt, besonders hervor. Für dieses Land wird von verschiedenen Gesundheitsgefährdungen aus den Abbaupraktiken sowie von negativen ökologischen Folgen mit Auswirkungen auf die lokale Bevölkerung berichtet. Des Weiteren stellt Kinderarbeit einen zentralen ethischen Aspekt

in Verbindung mit der Kobaltförderung dar. Der Platinabbau wird maßgeblich durch die Situation in Südafrika bestimmt. Hier sind die Arbeitsbedingungen, die Entlohnung der Minenarbeiter sowie deren allgemeine Lebensumstände häufig diskutierte Themen. Auch hierzu gibt es Meldungen über negative ökologische Aspekte mit Auswirkungen auf Luft, Boden und Gewässer.

Schritt 3: Betrachtungen auf Fahrzeugebene

Auf Basis der in Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen notwendigen Mengen der Rohstoffe wurden gesamtgesellschaftliche Betrachtungen auf Fahrzeugebene durchgeführt. Da die Platinbeladung der Brennstoffzelle einen Parameter mit großem Einfluss darstellt, wurden hierzu zwei verschiedene Szenarien ausgewertet, die eine hohe bzw. eine niedrige Platinbeladung annehmen.





© beajung/shutterstock

Ausgehend von den Rohstoffpreisen zum Ende des Jahres 2018 zeigt sich, dass von Lithium und Kobalt sowie in leicht geringerem Maße auch von Kupfer und Nickel erhebliche Kostenbeiträge für das BEV ausgehen. Die Platinbeladung in der Brennstoffzelle hat erhebliche Auswirkungen auf den Kostenbeitrag von Platin.

Hinsichtlich der verursachten THG-Emissionen ist der Beitrag von Lithium und Kobalt auf die Herstellung eines BEV deutlich geringer. Hier tritt die Bedeutung von Nickel und Kupfer deutlicher hervor, ebenso wie die von Platin für das FCEV. Für die Ergebnisse zu Kosten sowie zu den THG-Emissionen gilt, dass hier nur eine Auswahl an Rohstoffen betrachtet wurde und somit keine allgemeinen Aussagen zu den beiden betrachteten Fahrzeugtechnologien abgeleitet werden können.

Der Bewertung des makroskopischen Materialbedarfs wird die Annahme zugrunde gelegt, dass 25 % der heute weltweit existierenden PKW-Flotte bzw. 25 % der heute jährlich produzierten Fahrzeuge BEV bzw. FCEV sind. Die notwendigen Materialmengen, um ein Viertel der heutigen PKW-Flotte als BEV bzw. FCEV darzustellen, liegen unter den heute ausgewiesenen Reserven aller betrachteten Rohstoffe. **Die höchst-**

te Beanspruchung der Reserven verzeichnet Kobalt. Hierfür wären knapp die Hälfte der heutigen Reserven notwendig und unter der Annahme einer hohen Platinbeladung in der Brennstoffzelle wären 22 % der für heute geschätzten Reserven notwendig.

Die pro Jahr erforderlichen Rohstoffmengen, um ein Viertel der heute jährlich produzierten PKW als BEV bzw. FCEV darzustellen, übersteigen hingegen die heutigen Fördermengen für mehrere der betrachteten Rohstoffe. So wären hierfür knapp das Fünfeinhalbfache der heutigen Lithiumförderung notwendig sowie knapp das Doppelte der heutigen Kobaltförderung. Auch für Platin ergibt sich je nach unterstellter Beladung ein jährlicher Bedarf in Höhe des Ein- einhalbfachen bzw. knapp Dreieinhalbfachen der heutigen Förderung.

Grundsätzlich erscheint die **Gefahr einer physischen Verknappung der Vorräte als sehr gering.** Allerdings könnten aufgrund der hohen erforderlichen Steigerungsraten bei der Materialförderung durchaus **temporäre Engpässe und Verknappungen im Markt** auftreten. Gleichzeitig unterstreicht der notwendige Förderausbau die Relevanz, **positive ökologische und ethische Bedingungen bei der Rohstoffförderung sicherzustellen.**

Handlungsempfehlungen

Auf Basis der Ergebnisse leitet die Studie sieben Handlungsempfehlungen ab. Diese umfassen erstens die Reduktion von Rohstoffabhängigkeiten durch eine **verringerte Verwendung kritischer Rohstoffe** sowie durch Flexibilisierung hinsichtlich der einsetzbaren Technologien und Materialien im Fahrzeug.

Zweitens müssen **Kooperationen zwischen der verarbeitenden Industrie und den Rohstoffanbietern** geschaffen werden, um die Planungssicherheit hinsichtlich zukünftiger Marktbedingungen auf beiden Seiten zu erhöhen.

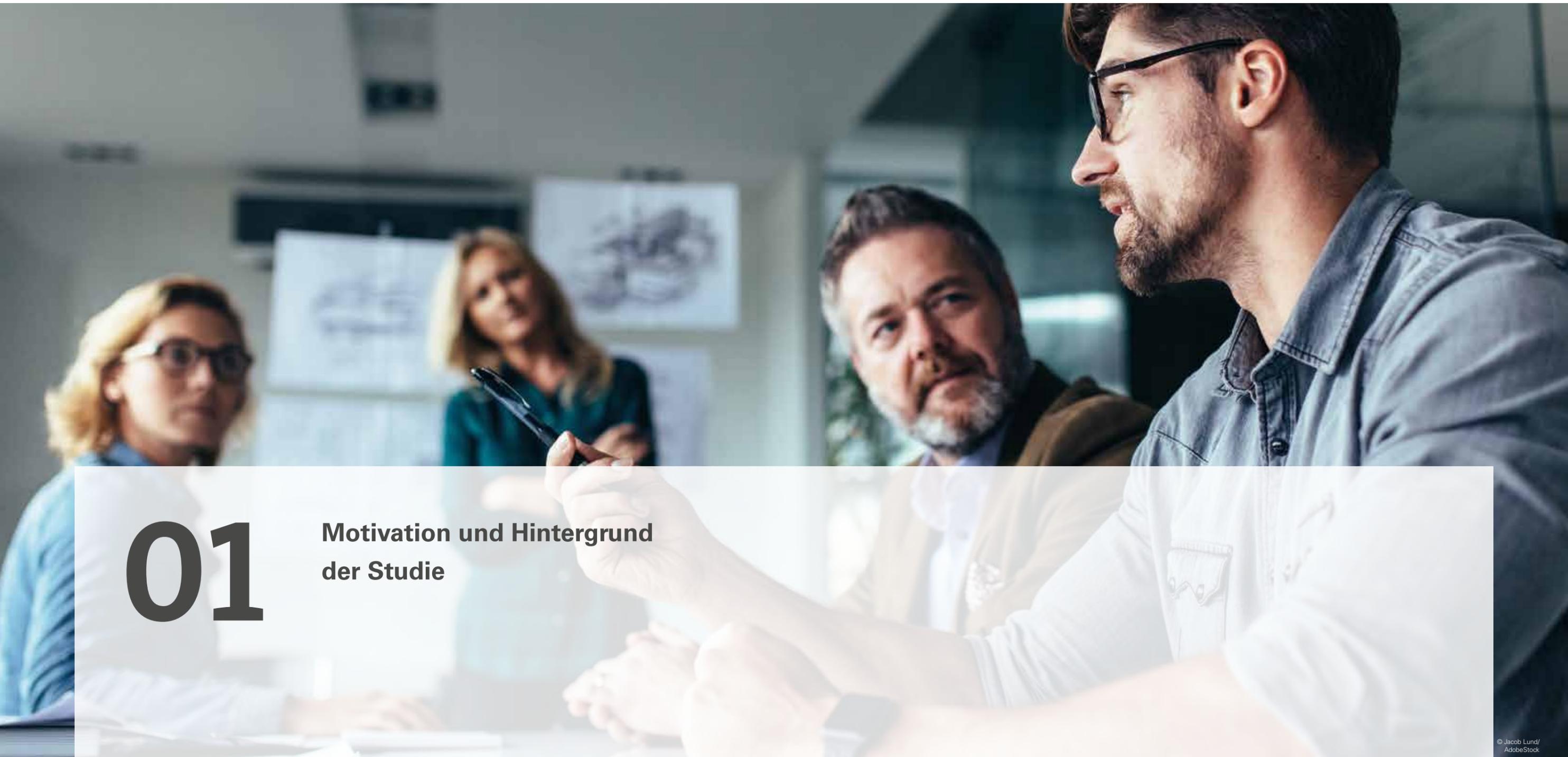
Die dritte Empfehlung zielt auf eine verstärkte **Kooperation zwischen Industrie und Recyclingunternehmen** ab und darauf, die Wiedergewinnung der Materialien effizienter und wirtschaftlicher zu gestalten. Ein Ansatzpunkt hierfür ist u. a. die Steigerung des möglichen Automatisierungsgrads in den verschiedenen Prozessen. Um die Potenziale des Recyclings voll auszuschöpfen, empfehlen sich darüber hinaus Kooperationen aller Stakeholder entlang der Wertschöpfungskette.

Als Viertes werden politische Maßnahmen angeführt, die dazu beitragen, die Stoffkreisläufe zu schließen. Dazu gehören insbesondere die Überarbeitung der **europäischen Batterierichtlinie** und die Einführung von individuellen **Mindestrecyclingquoten** für bestimmte Materialien statt der bisherigen Regelung eines gewissen Anteils an der Gesamtmasse.

Als Fünftes wird die positive **Gestaltung der Lieferkette von Primärrohstoffen** angeführt, was angesichts der beschriebenen Bedingungen eine Aufgabe von höchster Wichtigkeit darstellt. Hierbei müssen sowohl die Unternehmen als auch die Politik mitwirken. Multi-Stakeholder-Initiativen stellen ein beliebtes Instrument dar, um gemeinsam die Transparenz in der Lieferkette zu erhöhen und auf Verbesserungen hinzuwirken. Hier ist eine konsequente Umsetzung effizienter Maßnahmen von Seiten aller beteiligten Akteure gefragt.

Als sechste Maßnahme werden **ganzheitliche Betrachtungen** als Entscheidungsgrundlage zur Festlegung der regulatorischen Vorschriften im Verkehrssektor gefordert, um eine faire Vergleichsbasis für die Technologien sicherzustellen und um Verschiebungseffekten vorzubeugen.

Zuletzt wird die Sicherstellung einer belastbaren und aktuellen **Informationsbasis im Themenfeld des Rohstoffbezugs** als äußerst wichtige Grundlage dargestellt, um relevante Betrachtungen durchführen zu können und die breite Öffentlichkeit für die damit zusammenhängenden Herausforderungen zu sensibilisieren.



01

Motivation und Hintergrund der Studie

01

Motivation und Hintergrund der Studie

Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge setzen Schlüsseltechnologien ein, um den ökologischen Fußabdruck des Verkehrssektors in Zukunft signifikant zu senken. Dies umfasst nicht nur die Emissionsvermeidung lokaler Schadstoffe wie Feinstaub und Stickoxidemissionen, sondern darüber hinaus bieten beide Antriebstechnologien auch eine Möglichkeit, die durch den Verkehr verursachten Treibhausgasemissionen erheblich zu reduzieren, indem Strom und Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen gewonnen werden.

Allerdings gilt es zu bedenken, dass beide Technologien den Rohstoffbedarf zur Produktion der jeweiligen Fahrzeuge beträchtlich verändern. So benötigen Elektrofahrzeuge beispielsweise deutlich größere Mengen an Kupfer und darüber hinaus werden für die Schlüsselkomponenten Fahrzeugbatterie bzw. Brennstoffzelle Materialien benötigt, die bislang kaum oder nur in deutlich geringerem Maße für Fahrzeuge relevant waren. Bei der Batterie umfasst das beispielsweise Lithium und Graphit für die Anode sowie Kobalt für die Kathode. In Brennstoffzellen-Antriebssträngen werden Platin als Katalysator in der Brennstoffzelle und Edelstahl, Titan oder Graphit für die Bipolarplatten verwendet.

Hinter der Verwendung eines Rohstoffs in einem Produkt steht ein oft unterschätztes, höchst komplexes Profil aus verschiedensten Charakteristika. Diese umfassen beispielsweise die Frage, in welchen Ländern und aus welchen Erzen ein Rohstoff gewonnen wird und welche internationalen Handelsströme er nutzt, um dann als verarbeitbares Material in bestimmten Anwendungen eingesetzt zu werden. Die sich daraus ergebenden Marktpositionen sowie Abhängigkeiten sind wesentliche Einflussfaktoren für die Rohstoffpreise, die im Zusammenhang mit Nachfrage und Bedarf stehen und die Explorationsaktivitäten sowie den Aufbau von Kapazitäten bestimmen. Der Abbau von Rohstoffen stellt in aller Regel einen erheblichen Eingriff in die Umwelt dar und kann durch die Emission von verschiedenen Substanzen weitreichende Effekte auf die Ökosysteme nach sich ziehen. Auch die sozialen, wirtschaftlichen und politi-

schen Strukturen sind insbesondere in Rohstoffförderländern eng mit den Abbauaktivitäten verwoben. Hieraus ergibt sich eine oft zwiespältige Rolle des Rohstoffabbaus, was auch als „Ressourcenfluch“ bekannt ist. Nicht weniger wichtig sind die Fragen zu den verfügbaren Mengen der Rohstoffe, um eine Technologie langfristig zu nutzen, sowie die Verknappungseffekte, die dadurch auftreten können. Erfreulicherweise können einige Rohstoffe nach ihrer Nutzung in einem Produkt durch Recycling wiedergewonnen werden, was eine weitere Dimension im Themenfeld der Rohstoffnutzung darstellt.

Um die genannten Fragen im Zusammenhang mit der Rohstoffnutzung für Batterie- und Brennstoffzellen-Fahrzeuge als Hoffnungsträger im Verkehrssektor frühzeitig zu adressieren, wurde die vorliegende Studie erstellt. Sie stellt eine thematisch äußerst breite Analyse der verschiedenen Aspekte und Fragestellungen dar, die im Themenkomplex der Rohstoffnutzung für die zukünftigen Fahrzeugtechnologien relevant sind. Hierbei stehen die Rohstoffe selbst sowie die Fahrzeuge im Fokus der Betrachtungen.

Ziel der Studie ist es, tief reichende Einblicke in die unterschiedlichen Themenfelder zu ermöglichen und auf die dort gegebenen Herausforderungen sowie zielführende Ansätze hinzuweisen. Da die Lösung der Herausforderungen im Rohstoffsektor eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg von Batterie- und Brennstoffzellen-Fahrzeugen darstellt, ist es wichtig, sich frühzeitig mit diesen Fragen und Aufgaben auseinanderzusetzen und entsprechende Ansätze und Strategien zu entwickeln.





02

**Vorgehen und Aufbau
der Studie**

02

Vorgehen und Aufbau der Studie

Im folgenden Abschnitt werden das methodische Vorgehen im Rahmen der Studie sowie deren Aufbau beschrieben. Ebenso werden die Hintergründe der Kritikalitätsbewertung von Rohstoffen (Abschnitt 2.1) sowie die Rolle der Interviews mit Experten aus Wissenschaft und Industrie dargestellt (Abschnitt 2.2), die im Rahmen der Studie durchgeführt wurden.

Um Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge im Hinblick auf die für sie benötigten Rohstoffe zu analysieren, werden zunächst die beiden Antriebsformen betrachtet und die dafür eingesetzten gängigen Technologien vorgestellt (Abschnitt 3.1). Anschließend werden diese Technologien hinsichtlich ihrer Wirkungsweisen kurz beschrieben und es wird auf den damit verbundenen Rohstoffeinsatz eingegangen (Abschnitt 3.2). Kernstück der Experteninterviews bildet deren Beitrag zur Kritikalitätsbetrachtung, woraus sich eine Priorisierung der Materialien und eine Auswahl der für die Anwendungen als kritisch identifizierten Rohstoffe ergibt (Abschnitt 3.3).

Die für die Anwendungen als kritisch identifizierten Rohstoffe werden anschließend hinsichtlich zahlreicher Aspekte detailliert untersucht: In Kapitel 4 werden die Förderländer der Rohstoffe vorgestellt, außerdem wird die Verwendung der Rohstoffe auch abseits von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen dargestellt. Anschließend wird die Entwicklung von Rohstoffabbau und Reserven seit Mitte der 1990er Jahre betrachtet (Kapitel 5). Kapitel 6 richtet den Fokus auf die historische und die aktuelle Preisentwicklung, auf die Kostenstrukturen sowie den zu erwartenden Preisdruck, dies erfolgt in Form einer Gegenüberstellung von Angebot und Nachfrage. Kapitel 7 wirft einen Blick auf ökologische Aspekte, genauer gesagt auf Primärenergieaufwand und Treibhausgasemissionen aufgrund der Rohstoffbereitstellung. Kapitel 8 beschäftigt sich mit dem Recycling der verschiedenen Materialien und in Kapitel 9 werden ethische Aspekte im Zusammenhang mit der Bereitstellung der Rohstoffe zusammen mit Initiativen der OEMs betrachtet. Auch

in diese detaillierten Betrachtungen fließen Informationen aus den Experteninterviews ein, beispielsweise zum Themenfeld Recycling. Aufbauend auf den Ergebnissen der detaillierten Betrachtung zu jedem Rohstoff wird in Kapitel 10 eine zusammenfassende Darstellung für die beiden Fahrzeugtechnologien vorgenommen. Hierbei werden die für ein Fahrzeug notwendigen Materialmengen ermittelt und die daraus resultierenden Beiträge zu Kosten und ökologischen Aspekten pro Fahrzeug analysiert. Ebenso werden makroskopische Effekte hinsichtlich des notwendigen Ausbaus der Förderkapazitäten und der Verknappung der heutigen Reserven betrachtet, die von der Rohstoffverwendung im Rahmen der entsprechenden Fahrzeugtechnologien ausgehen.

Auf Basis der Ergebnisse werden in Kapitel 11 Handlungsempfehlungen für verschiedene Akteure abgeleitet, bevor die Studie mit einem Fazit abgeschlossen wird (Kapitel 12).

2.1 Kritikalitätsuntersuchung

Dass moderne Technologien zum Einsatz einer Vielzahl an unterschiedlichen Materialien führen, macht es praktisch unmöglich, für sämtliche dieser Rohstoffe eine umfassende Untersuchung inklusive der technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Gesichtspunkte vorzunehmen. Aus diesem Grund ist es im Rahmen dieser Studie notwendig und zielführend, die Rohstoffe hinsichtlich ihrer Relevanz zu charakterisieren und nur die für die Anwendungen als kritisch identifizierten Rohstoffe der detaillierten Betrachtung zu unterziehen.

Als Instrument zur Relevanzbestimmung wird im Rahmen dieser Studie eine sogenannte Kritikalitätsuntersuchung durchgeführt, ein Vorgehen, das seit einigen Jahren vermehrt Anwendung findet und mittlerweile ein etabliertes Instrument zur Bewertung von Rohstoffen und Materialien darstellt. Während im Folgenden die Hintergründe kurz skizziert werden, wird im nachfolgenden Kapitel auf die spezielle Ver-

wendung der Methodik im Rahmen der Studie eingegangen. Klassische Kritikalitätsbetrachtungen verwenden einen Ansatz aus dem Risikomanagement und bewerten Rohstoffe anhand von zwei unabhängigen Parametern.

Mittlerweile wurde der Ansatz in einer VDI-Richtlinie, genauer gesagt im Blatt 2 der VDI 4800, „Ressourceneffizienz“, aufgenommen, in der eine sehr detaillierte Anleitung zur Durchführung einer solchen Betrachtung inkl. Vorgaben der zu bildenden Indikatoren gegeben wird (VDI 2018).

1. Das Versorgungsrisiko (oder gegensätzlich dazu: die Versorgungssicherheit)

Dieser Parameter quantifiziert die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt eines Versorgungsengpasses für einen bestimmten Rohstoff

2. Die Folgeschwere eines Versorgungsengpasses (häufig auch als „Vulnerabilität“ oder „Wichtigkeit eines Rohstoffs“ bezeichnet)

Dieser Parameter quantifiziert die Schwere der Konsequenzen, die von einem tatsächlich eintretenden Versorgungsengpass ausgehen (würden)

In aller Regel nehmen derartige Betrachtungen die Rohstoff-situation in einer bestimmten Volkswirtschaft oder in einem speziellen Industriesektor in Augenschein. Relativ früh durchgeführte Untersuchungen waren beispielsweise die vom U.S. National Research Council veröffentlichte Studie zu „Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy“ (National Research Council 2008) und die ebenfalls im Jahr 2008 durchgeführte Studie, die das Vereinigte Königreich im Fokus hatte (Eatherley und Morley 2008). Darüber hinaus entstanden weitere Studien, beispielsweise die Studien über „Kritische Rohstoffe für Deutschland“ (Erdmann und Behrend 2011) und insbesondere die regelmäßig aktualisierten Veröffentlichungen der Europäischen Kommission (European Commission 2010, 2014, 2017b).

2.2 Rolle der Experteninterviews für die Studie

Ein zentrales Ziel der Experteninterviews war die Quantifizierung der Folgeschwere eines Versorgungsengpasses für die betrachteten Fahrzeugtechnologien. Hierzu wurden die Interviewpartner anhand eines Fragebogens zur Schwere der technischen und wirtschaftlichen Konsequenzen befragt, die von der Versorgungslimitation eines konkreten Rohstoffs für die jeweilige Fahrzeugtechnologie ausgehen.

Neben der Ermittlung der Folgeschwere bei Versorgungsengpässen wurde die Expertenbefragung auch dazu verwendet, die Auswahl der relevanten Technologien (Kapitel 3) zu validieren. Ebenso wurden die Befragten hinsichtlich der erwarteten Rolle des Recyclings der Rohstoffe sowie zur erwarteten Marktverfügbarkeit und zu daher notwendigen Maßnahmen in der Materialbeschaffung befragt. Die Ergebnisse hieraus werden an den entsprechenden Stellen der Studie aufgegriffen und näher betrachtet (z. B. Kapitel 8).

Mit einigen der Experten wurden neben der Befragung mittels des standardisierten Fragebogens zusätzlich Telefoninterviews durchgeführt, um einige Aspekte genauer beleuchten zu können und weitergehende Fragen zu thematisieren. Somit konnten die befragten Experten insbesondere an dem Identifikationsprozess der für die beiden Technologien kritischen Rohstoffe teilnehmen und diesen begleiten, aber auch weitergehende Anregungen zur Studie aus ihrer Perspektive in den Entstehungsprozess der Studie einfließen lassen.



03

Relevante Technologien und Rohstoffe

03

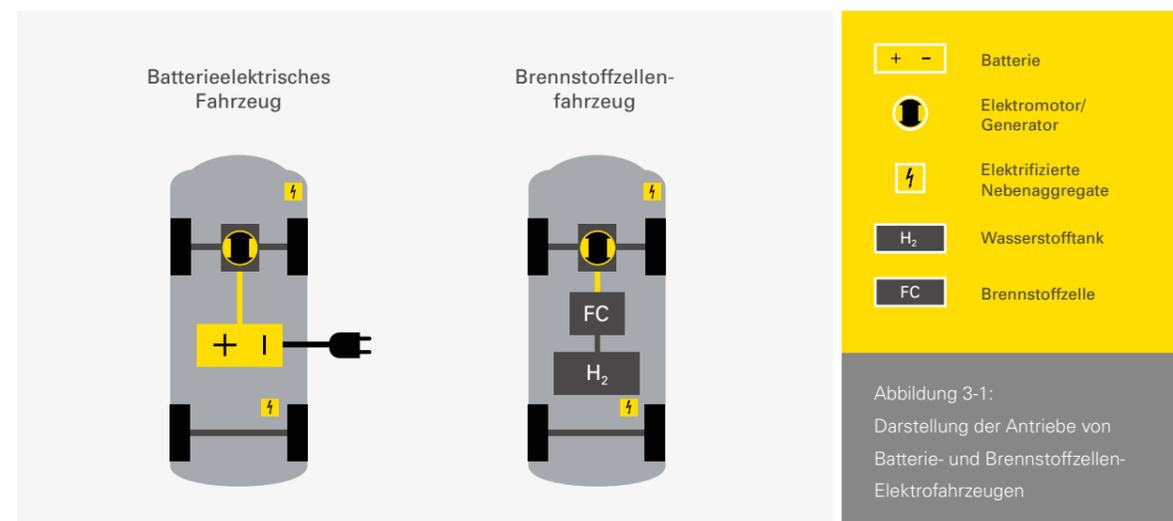
Relevante Technologien und Rohstoffe

In diesem Kapitel werden zunächst Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge als innovative Fahrzeugtechnologien vorgestellt und anschließend ihre Kernkomponenten sowie die dafür einsetzbaren Technologien betrachtet (Abschnitt 3.1). In einem zweiten Schritt werden die benötigten Rohstoffe identifiziert (Abschnitt 3.2) und deren Relevanz anhand einer Kritikalitätsbetrachtung durch Auswertung der Antworten aus den Experteninterviews bewertet (Abschnitt 3.3). In den folgenden Kapiteln werden die für die Anwendungen als kritisch identifizierten Rohstoffe eingehend hinsichtlich unterschiedlicher Aspekte untersucht.

3.1 Auswahl der relevanten Technologien

Ziel der Studie ist eine Betrachtung der für Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge benötigten Rohstoffe. Hierzu erfolgt in einem ersten Schritt eine technologische Betrachtung, um die Kernkomponenten der beiden Antriebsstränge besser zu verstehen (Abbildung 3-1).

Der wichtigste Unterschied zwischen den beiden Antriebsformen ist offensichtlich durch die Verwendung einer Batterie bzw. durch die Verwendung einer Brennstoffzelle inkl. eines Speichertanks für Wasserstoff (H₂) gegeben. Zwar verwendet auch ein Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug eine Pufferbatterie, um die Brennstoffzelle möglichst stationär zu betreiben, auch wenn die Fahrsituation gerade eine sehr dynamische Leistungsabgabe erfordert. Diese Pufferbatterie ist allerdings in aller Regel sehr klein dimensioniert (typische Größe von wenigen kWh) und wird daher nicht näher betrachtet. Eine Ausnahme stellen Fahrzeuge mit Mischantrieben dar, wie ein Brennstoffzellen-Plug-in-Hybrid oder auch Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzellen-Range-Extender. Im Folgenden werden allerdings nur die beiden reinen Antriebstypen betrachtet. Tabelle 1 fasst die Kernkomponenten dieser beiden zusammen, für die unterschiedliche Technologien und Materialien verwendet werden können.



© Altenburg et al. 2017

BEV	FCEV	BEV + FCEV
Traktionsbatterie	Brennstoffzelle	Elektromotor
	H ₂ -Speichertank	Kabelbaum

Tabelle 3-1: Spezifische und gemeinsame Kernkomponenten der beiden Fahrzeugkonzepte (exemplarische Auflistung)

Für die Traktionsbatterien in BEV erscheinen Lithium-Ionen-Batterien aufgrund ihrer Speicherdichte als der geeignetste Batterietyp. Klassische Bleibatterien und auch Nickel-Metallhydrid-Batterien sind angesichts der hohen gewünschten Energiemengen in BEV zu schwer. Auch Redox-Flow-Batterien (z. B. auf Vanadiumbasis) bringen ein höheres Gewicht mit sich und werden in Zukunft daher wohl eher in stationären Anwendungen zu finden sein. Der Einsatz von Hochtemperaturbatterien, wie beispielsweise Natrium-Schwefel- oder Natrium-Nickelchlorid-Batterien (auch Zebra-Batterie genannt), ist aufgrund ihrer hohen Betriebstemperaturen von mehr als 250 °C und der Verwendung von flüssigem Natrium hinsichtlich des Einsatzes in Fahrzeugen sehr umstritten.

Zwar werden den Feststoffbatterien, insbesondere Lithium-Schwefel- und Lithium-Luft-Zellen, hohe Erwartungen für die Anwendung in mobilen Anwendungen entgegengebracht, allerdings erscheinen diese im Hinblick auf ihren aktuellen Entwicklungsstand erst mittelfristig (d. h. nach 2030) einsetzbar. Diese Einschätzung wurde von einer Vielzahl der befragten Experten bestätigt. Stattdessen sehen die Experten den Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien, in aller Regel mit Nickel-Mangan-Kobalt-Kathode (NMC) sowie mit graphitbasierter Anode, als die Technologie der Wahl für BEV an. Hierbei wird sich der Trend zu einer Erhöhung des Nickelanteils fortsetzen.¹ Für weitere Fahrzeuge wie z. B. Nutzfahrzeuge könnten laut Meinung der Experten auch Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP) eine wichtige Rolle einnehmen.

Zu den verfügbaren Brennstoffzellentechnologien gehören die alkalische Brennstoffzelle (Alkaline Fuel Cell, AFC), die Phosphorsäure-Brennstoffzelle (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC), die Brennstoffzelle mit Protonenaustauschermembran (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC), die Direktmethanol-Brennstoffzelle (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC) und die Festoxid-Brennstoffzelle (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC). Angesichts des aktuellen Entwicklungsstandes dieser Technologien und deren Eignung für mobile Anwendungen der näheren Zukunft scheint die PEMFC die geeignetste

Technologie für mobile Anwendungen zu sein, was durch die eindeutige Einschätzung der Experten bekräftigt wird.

Für die Speicherung von Wasserstoff stehen ebenfalls verschiedene Technologieansätze zur Auswahl.

1. Die Speicherung als Gas unter Druck:
heute 700 bar in PKW und 350 bar in Bussen gängig
2. Die kryogene Speicherung als verflüssigter Wasserstoff (bei Temperaturen um -250 °C)
3. Eine Kombination von Druck und Verflüssigung („cryo-compressed“)
4. Die Speicherung in Metallhydriden
5. Die Speicherung an organischen Trägerflüssigkeiten (Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC)

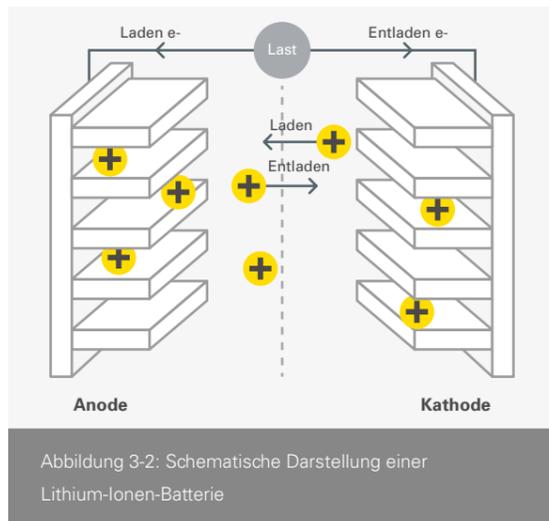
Hinsichtlich der Speicherung favorisieren die befragten Experten eindeutig die Druckspeicherung, insbesondere bei hohen Druckniveaus. Die weiteren genannten Optionen erscheinen zwar auch interessant, werden aber als langfristige Optionen angesehen, die in Serienfahrzeugen der näheren Zukunft noch keine Anwendung finden werden.

3.2 Beschreibung der geeigneten Technologien und der notwendigen Rohstoffe

Lithium-Ionen-Batterien

Wie im vorangegangenen Abschnitt bereits dargestellt, werden Lithium-Ionen-Batterien als die passendste Technologie für die Traktionsbatterie in Batterie-Elektrofahrzeugen angesehen und daher im Folgenden näher beschrieben. Eine solche Batterie beinhaltet eine Kathode und eine Anode, die durch eine Separatormembran getrennt werden. Je nach Lade- oder Entladebetrieb wandern Lithium-Ionen von der einen zur anderen, während die Batterie an ihren externen Polen elektrischen Strom zur Verfügung stellt. Ein Elektrolyt stellt die Leitfähigkeit für die Lithium-Ionen zwischen Kathode und Anode sicher.

¹ | Eine klassische NMC-Kathode enthält Nickel, Mangan und Kobalt in gleichem Verhältnis und wird daher als 3/3/3- oder 1/1/1-Kathode bezeichnet. Aus wirtschaftlichen und technischen Gründen wird aber der Nickelanteil zunehmend gesteigert, so dass aktuell das Mischverhältnis 6/2/2 eingesetzt und zukünftig ein Verhältnis von 8/1/1 angestrebt wird.



© Romare 2017

sches Graphit verwendet, wobei ebenso eine Verbindung aus Titanoxid möglich wäre.

Aufgrund der beschriebenen Rohstoffverwendung in Lithium-Ionen-Batterien für den Automobilsektor werden die Materialien Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt, Aluminium, Eisen und Phosphor sowie natürliches und synthetisches Graphit im Rahmen einer Kritikalitätsuntersuchung nach dem in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Vorgehen bewertet. Hierfür wird unterstellt, dass das Aluminium aus Bauxit, synthetisches Graphit aus erdölbasiertem Kohlenstoff und Phosphor aus Phosphatgestein gewonnen wird.

PEM-Brennstoffzellen

Wie zuvor beschrieben stellen Brennstoffzellen mit Protonenaustauschmembran (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) die vielversprechendste Option für den mobilen Einsatz im Automobilbereich dar. Um ein grundsätzliches Technologieverständnis zu vermitteln und um die Rolle der dabei notwendigen Rohstoffe verstehen zu können, werden der Aufbau und die Funktionsweise einer PEM-Brennstoffzelle im Folgenden näher beschrieben.

Grundsätzlich werden in allen Brennstoffzellen Energieträger (wie Wasserstoff, Erdgas oder auch Methanol) verstromt. Je nach Zelltyp findet dazu eine bestimmte Reaktion an den beiden Elektroden der Brennstoffzelle statt. Bei der PEMFC werden in aller Regel die beiden Elektroden, die per Siebdruck-

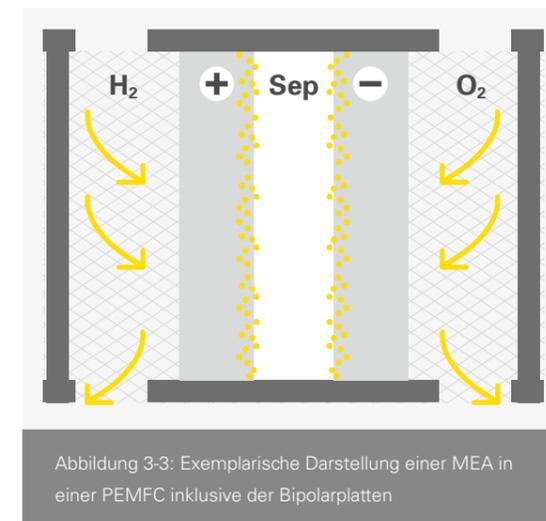
Zwar können unterschiedliche Materialien für den Elektrolyten (fest oder flüssig) sowie für die Separatormembran verwendet werden, doch sind insbesondere die Materialien für die Anode und die Kathode besonders relevant. Wie in Tabelle 3-2 dargestellt, werden für die Kathode insbesondere Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) oder Lithium-Eisenphosphat (LFP sowie von Tesla auch Nickel-Kobalt-Aluminium (NCA)) eingesetzt. Oft kommt auch eine Mischung aus Nickel-Mangan-Kobalt mit Lithium-Manganoxid (LMO) zum Einsatz. Auf der Anodenseite wird in aller Regel natürliches oder syntheti-

BEV	Kathode	Anode
Tesla Model S	NCA	Graphit
Nissan Leaf	NMC/LMO	Graphit
BMW i3	NMC	Graphit
Tesla Model X	NCA	Graphit
Renault Zoe	LMO/NMC	
BYD e6	LFP	

© Romare 2017

Tabelle 3-2: Verwendung von unterschiedlichen Materialien für Kathode und Anode in BEV

verfahren mit einem Katalysator versehen werden, direkt auf einer dünnen Festelektrolytschicht aufgesetzt und bilden so eine Membran-Elektroden-Einheit (Abbildung 3-3). Die daraus resultierende Bauweise wird im englischen Membrane Electrode Assembly genannt, woraus die auch im Deutschen geläufige Abkürzung „MEA“ resultiert. Mehrere dieser Membran-Elektroden-Einheiten werden aneinandergereiht und durch sogenannte Bipolarplatten, in denen Strömungskanäle für die entsprechenden Gase vorgesehen sind, voneinander getrennt. Durch diesen gestapelten Aufbau ergibt sich der Brennstoffzellenstack. Die beiden Elektroden werden von einem Separator, der den Elektrolyten häufig beinhaltet, elektrisch getrennt und nur bestimmte Ionen können den Separator passieren. Entsprechend dem Namen PEMFC können nur Protonen (also Wasserstoffionen) den Separator passieren und die Anode erreichen, wo sie zusammen mit Sauerstoff Wasser bilden.



© Kurzweil 2016

Im Folgenden werden die Elemente einer PEMFC mit den dafür verwendeten Werkstoffen von innen nach außen beschrieben: Elektrolyt und Membran bestehen in aller Regel aus Nafion® oder ähnlichen Nachfolgeprodukten aus perfluorierten und sulfonierten Polymeren. Daran anschließend liegen die Elektroden, die mit Platin als Katalysator versehen werden. Da die Anwesenheit von CO die Wirkung von Platin hemmt („Platinvergiftung“), kann Ruthenium hinzugegeben werden, um die CO-Toleranz der Brennstoffzelle zu erhöhen. Auch Kobalt kann als Katalysator mitverwendet werden. Für die außen liegenden Bipolarplatten können verschiedene

Werkstoffe eingesetzt werden: In der Regel werden sie aus Graphit oder einem Metall gefertigt. Da sie allerdings einer korrosiven Umgebung ausgesetzt sind, müssen sie aus entsprechend beständigen Materialien, wie Titan oder Edelstahl, hergestellt sein (Kurzweil 2016).

Auf Basis der genannten Rohstoffe werden in der folgenden Kritikalitätsuntersuchung Platin, Kobalt, natürliches und synthetisches Graphit sowie Titan für den Einsatz in der Brennstoffzelle untersucht. Ruthenium wird nicht separat betrachtet, da es wie Platin zur den Platingruppenmetallen (PGM) gehört. Es wird unterstellt, dass die Herstellung von synthetischem Graphit Erdöl als Ausgangsbasis verwendet (Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 2010).

H₂-Speichersysteme

Wasserstoffspeichersysteme sind ein zentrales Bauteil in Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen. Da Wasserstoff bei Normalbedingungen eine geringe Dichte von 0,089kg/m³ aufweist, werden zur Speicherung im Fahrzeug Hochdrucktanks verwendet, in denen der Wasserstoff komprimiert aufbewahrt wird.

Grundsätzlich wird zwischen verschiedenen Tanktechnologien mit der Typbezeichnung I bis IV unterschieden. Typ I bis III kennzeichnen Tanks aus Metall, die entweder ohne zusätzliche Ummantelung (Typ I) oder mit Ummantelung aus Glas- bzw. Karbonfasern als Verbundmaterialien (Typ II bzw. Typ III) hergestellt werden (Barral und Barthélémy 2006; Reuter et al. 2017). Für den Einsatz in Fahrzeugen wird ein hohes Druckniveau angestrebt, da so eine möglichst große Menge an Wasserstoff bei geringem Volumenbedarf erreicht wird und sich das H₂-Speichersystem besser in die Fahrzeugarchitektur integrieren lässt. Während in größeren Fahrzeugen wie Bussen auch 350-bar-Tanks üblich sind, hat sich für PKW ein Druck von 700 bar durchgesetzt. Neben dem Volumen ist außerdem das Gewicht des Speichersystems eine für den Fahrzeugbau äußerst wichtige Größe. Aufgrund der genannten Anforderungen kommen für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge nur Tanks des Typs IV infrage, also Behälter aus Kunststoff, die zusätzlich mit Kohlenfaser umwickelt sind.

Der eigentliche Behälter eines Typ-IV-Wasserstofftanks besteht aus Kunststoff und hat die Funktion, eine Gasdiffusion durch die Tankwände zu verhindern. Allerdings stellt dieser nur etwa 10 % der Gesamtmasse eines Tanks dar. Der mit ca. 70 % größte Teil der Gesamtmasse ist der Wicklung aus Kohlenstofffaser zuzuschreiben, die heutzutage in aller Regel

aus Polyacrylnitril (PAN) hergestellt und mit Epoxidharz imprägniert wird (Plastics today 2016; Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 2010). Hinzu kommen noch das Ventil sowie Rohrverbindungen bzw. Anschlüsse zur Führung des Wasserstoffs zur Brennstoffzelle. Diese bestehen aus Edelstahl bzw. Kohlenstoffstahl und ergeben den Rest der Gesamtmasse des Tanksystems (Elgowainy 2012).

Aufgrund der beschriebenen Rohstoffverwendung werden im Rahmen der Kritikalitätsbetrachtung PAN-basierte Kohlenstofffasern und Epoxidharz zur Verwendung für H₂-Speichertanks betrachtet und für beide wird Erdöl als Ausgangsbasis unterstellt (Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 2010).

Permanentmagnete für Elektromotoren

Es gibt eine Reihe unterschiedlicher Typen von Elektromotoren sowie Mischformen daraus, die als Antriebseinheit in elektrischen Fahrzeugen eingesetzt werden können (Abbildung 3-4). Die wichtigsten davon sind:

1. der permanenterregte Synchronmotor (PSM)
2. der Asynchronmotor (ASM)
3. der geschaltete Reluktanzmotor (SRM)

Ein PSM nutzt entsprechend seinem Namen Permanentmagnete im Rotor. Dieser passt sich an das Magnetfeld an, das durch die Statorwicklungen aufgebracht wird. Ein ASM hingegen verwendet einen Kurzschlussläufer (auch Käfig genannt) aus Aluminium oder Kupfer. Auch dessen Drehung wird durch das vom Stator aufgebrachte rotierende Magnetfeld verursacht. Neben dem unterschiedlichen Aufbau des Rotors ist ein ASM in aller Regel schwerer und weniger kompakt als ein PSM, weshalb Letztgenannter bevorzugt im Automobil eingesetzt wird. Der geschaltete Reluktanzmotor wird in seiner Reinform eher selten im Automobilbau eingesetzt. Allerdings wird versucht, den Reluktanzeffekt auch bei einem PSM zu nutzen und dadurch die erforderliche Masse von Permanentmagneten zu reduzieren.

Die heute hierfür eingesetzten Permanentmagnete sind in aller Regel Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB). Der größte Teil der Materialzusammensetzung ist Eisen, der Anteil von Seltenerdmetallen liegt bei ca. 30 % und nur ein sehr geringer Anteil von ungefähr 1 % entfällt auf Bor. Hierbei ist es wichtig zu erwähnen, dass Neodym zwar das wichtigste der Seltenerdmetalle darstellt, allerdings wird in geringerer Menge auch Dysprosium eingesetzt (Nd-Anteil 83 %, Dy-Anteil 17 %), um die Temperaturwiderstandsfähigkeit von Magneten zu erhöhen. Diese beiden Seltenerdmetalle stellen somit die essenziellen Bestandteile von Permanentmagneten dar,

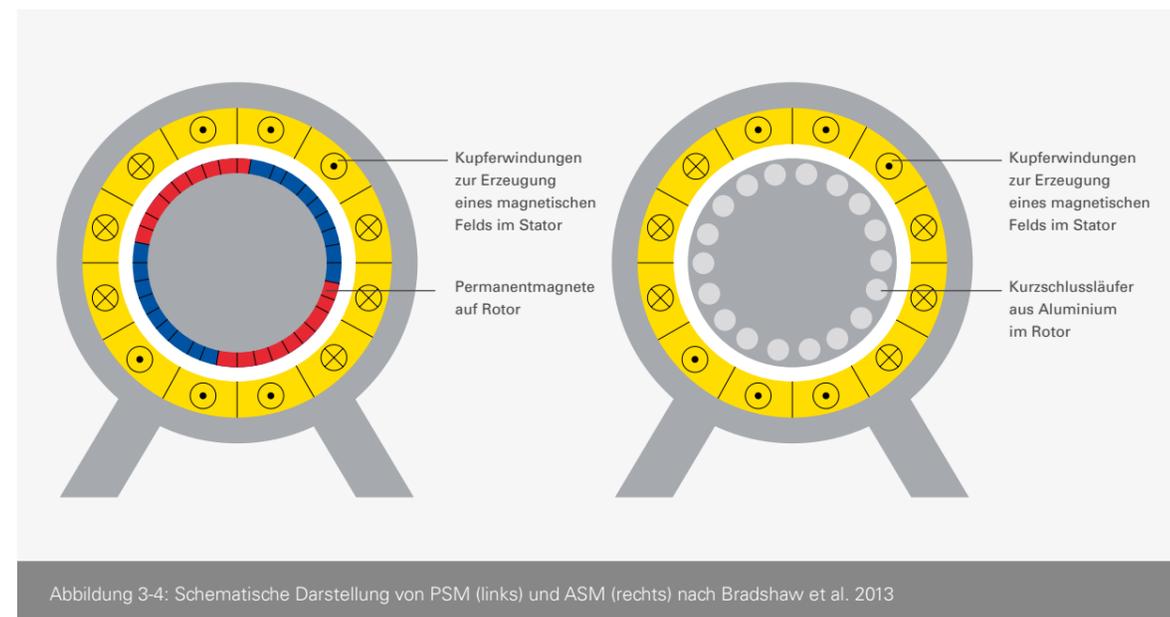


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung von PSM (links) und ASM (rechts) nach Bradshaw et al. 2013

© nach Bradshaw et al. 2013

auch wenn sie oft in geringerer Menge durch Praseodym oder Terbium ersetzt werden (Buchert et al. 2014; Öko-Institut 2017; Berkel 2013; Widmer et al. 2015; Burres 2016; Adler 2017; Schüler et al. 2011; Reuter 2016; Glöser-Chahoud et al. 2016).

Im Rahmen der Kritikalitätsuntersuchung wurde der Einsatz von Seltenerdmetallen für Permanentmagnete in Elektromotoren sowie von Kupfer für die im Stator befindlichen Wicklungen untersucht.

Kabelbäume

Aufgrund der Vielzahl elektrischer Verbraucher in modernen Fahrzeugen ist auch bei PKW mit Verbrennungsmotoren der sogenannte Kabelbaum, also die Architektur der zur Signal- und Energieübertragung eingesetzten elektrischen Leitungen, in den letzten Jahren immer komplexer und schwerer geworden. Hauptbestandteil der Kabel ist Kupfer. In durchschnittlichen Verbrenner-PKW werden je nach Fahrzeuggröße und Segment zwischen 4 und 22 kg Kupfer eingesetzt (Lepan 2018), der gesamte Kabelbaum in einem Premiumfahrzeug kann 50 bis 60 kg wiegen (Pester 2015).

In Elektrofahrzeugen wird darüber hinaus auch Kupfer im Elektromotor, insbesondere in den Wicklungen des Stators, eingesetzt. Des Weiteren findet sich das Metall in der Verbindung von Batterie bzw. Brennstoffzelle und Elektromotor und in weiteren Komponenten, wie beispielsweise dem fahrzeugseitigen Ladeequipment. Nach Berechnungen des Branchenverbands International Copper Association können in einem batterieelektrischen PKW Kupferkabel mit einer Länge von bis zu sechs Kilometern verbaut sein (Reuters 2017). Zwar wird der Einsatz von Aluminiumkabeln besonders aus Kosten-, aber auch aus Gewichtsgründen angedacht, doch ist deren Verwendung mit gewissen technischen Herausforderungen verbunden (Spinarke 2015). Entsprechend wird im Rahmen der Kritikalitätsuntersuchung der Einsatz von Kupfer im Kabelbaum betrachtet.

3.3 Kritikalitätsuntersuchung und Identifikation der für die Anwendungen kritischen Rohstoffe

Alle zuvor genannten Rohstoffe werden nun bezüglich der entsprechenden Anwendungen einer Kritikalitätsanalyse unterzogen, um auf Basis der Ergebnisse die kritischen Rohstoffe zu identifizieren und diese anschließend detailliert zu betrachten. Dazu wird zunächst die genaue Methodik der Kritikalitätsbetrachtung im Rahmen dieser Studie erläutert

(Abschnitt 3.3.1). Daraufhin werden die Resultate für das Versorgungsrisiko (Abschnitt 3.3.2) und die Folgeschwere eines eintretenden Versorgungsengpasses (Abschnitt 3.3.3) betrachtet.

3.3.1 Die Kritikalitätsbetrachtung im Rahmen dieser Studie

Wie bereits dargestellt, soll der Ansatz der Kritikalitätsbewertung im Rahmen der Studie genutzt werden, um die Relevanz der verschiedenen Rohstoffe für die Nutzung in Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen zu bewerten. Hierfür muss der Ansatz allerdings adaptiert werden, um das Versorgungsrisiko und die Folgeschwere eines Engpasses für die genannten Anwendungen auszuwerten, wobei sich das Vorgehen an den Ansätzen der VDI 4800 orientiert.

Um das Versorgungsrisiko im Rahmen der Studie zu quantifizieren, werden folgende fünf Indikatoren entsprechend den Vorgaben in der VDI 4800 ausgewertet.

1. Statische Reichweite, also das Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresförderung
2. Kritische Konzentration der Rohstoffproduktion, ausgedrückt durch den Herfindahl-Hirschman-Index (HHI)² der Länderproduktion
3. Kritische Konzentration der Rohstofflagerstätten, d. h. der HHI der Reserven
4. Politisches Länderrisiko, dargestellt durch den anhand der Worldwide Governance Indicators der Weltbank (World Bank 2017) gewichteten HHI der Länderproduktion. Folgende Indikatoren werden nach VDI 4800 hierfür von der Weltbank verwendet:
 - a) Mitspracherecht und Verantwortung
 - b) politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt
5. Regulatorisches Länderrisiko, dargestellt durch den anhand der Worldwide Governance Indicators der Weltbank (World Bank 2017) gewichteten HHI der Länderproduktion. Folgende Indikatoren werden nach VDI 4800 hierfür von der Weltbank verwendet:
 - a) Schutz des Eigentums
 - b) Handels-, Wettbewerbs- und Umweltpolitik
 - c) Korruptionskontrolle
 - d) Bürokratieaufwand und öffentliche Daseinsfürsorge

² | Der HHI berechnet sich aus der Summe der quadratischen Anteile an einer Gesamtheit. Ein HHI von 1 zeigt somit ein Monopol an, bei dem eine vollständige Konzentration auf einen einzigen Akteur vorliegt, wohingegen ein HHI von 0 eine perfekte gleichmäßige Verteilung unter (unendlich) vielen Akteuren darstellt.

Das Ergebnis der Auswertung zu den genannten fünf Indikatoren wird mit einem bestimmten Zahlenwert zwischen 0 für ein geringes und 1 für ein hohes Versorgungsrisiko ausgedrückt.³ Der Gesamtwert für das Versorgungsrisiko wird nicht durch den Mittelwert der fünf Indikatorenwerte berechnet. Bedenklichere Zahlenwerte erhalten stattdessen durch das in der VDI 4800 geforderte „Verfahren nach der degressiven Addition“ ein höheres Gewicht, wodurch eine vorsichtiger Einschätzung resultiert.

An dieser Stelle sei kurz auf die zeitlichen Veränderungen hingewiesen, denen die fünf Indikatoren unterliegen. Sie werden zum einen durch die Veränderungen in den Fördermengen der jeweiligen Länder und zum anderen durch die ausgewiesenen Menge der Reserven (Abschnitt 5.1) beeinflusst. Somit können Betrachtungen zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedliche Ergebnisse mit sich bringen.

Zur Bestimmung der Folgeschwere eines Versorgungspasses werden die Befragungen von Experten aus Industrie und Wissenschaft genutzt. Hierbei werden die technischen und die ökonomischen Auswirkungen eines Rohstoffengpasses auf Batterie- sowie Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge

abgefragt und es wird eine Einschätzung entsprechend den beiden Kategorien vorgenommen. Die Einteilung hinsichtlich der technischen Auswirkungen ist der VDI 4800 entnommen und in Tabelle 3-3 dargestellt. Die ökonomische Klassifizierung wird analog gebildet. Die beiden aus den Antworten der Experten gebildeten Mittelwerte werden wie zuvor entsprechend der Aggregierungsmethode in der VDI 4800 zusammengeführt und bilden somit den finalen Wert zur Darstellung der Folgeschwere im Falle eines Versorgungspasses jedes Rohstoffs.

An dieser Stelle soll kurz darauf hingewiesen werden, dass für einen Rohstoff anhand der dargestellten Indikatoren ein eindeutiger Zahlenwert für das Versorgungsrisiko ermittelt wird. Im Gegensatz dazu wird die Verwendung eines Materials in unterschiedlichen Anwendungen (z. B. Graphit für die Anode in Batterien und als Bipolarplatten in Brennstoffzellen) in aller Regel durch die individuellen Substitutionsmöglichkeiten in den entsprechenden Technologien sehr unterschiedlich angesehen. Dies führt somit auch zu zwei individuellen Zahlenwerten hinsichtlich der Folgeschwere im Falle eines Versorgungspasses des Rohstoffs, je nach Zielanwendung.

Wertebereich	Definition
1 (essenziell)	Die Funktion des Produkts ist ohne den Rohstoff/das Rohmaterial nicht gegeben, der Rohstoff/Werkstoff ist für die Herstellung der Produkte essenziell und nicht ersetzbar.
0,7 (sehr wichtig)	Die Funktion des Produkts ist maßgeblich auf den Rohstoff/Werkstoff angewiesen; eine Substitution durch andere Rohstoffe/Werkstoffe würde zu erheblichen Funktionsstörungen und Qualitätseinbußen führen.
0,3 (wichtig)	Die Funktion des Produkts bleibt erhalten, wenn der Rohstoff/Werkstoff ersetzt wird, die Qualität des Produkts sinkt jedoch.
0 (gering)	Der Rohstoff/Werkstoff ist ersetzbar: Mit Substituten wird gleiche Funktionalität und eine vergleichbare oder wenig verminderte Qualität des Produkts erreicht.

© VDI 2018

Tabelle 3-3: Kategorisierung der technischen Folgeschwere nach VDI 4800

3 | Entsprechend dem Verfahren in der VDI 4800 werden nur folgende Werte vergeben: 0; 0,3; 0,7; 1.

3.3.2 Ergebnisse für das Versorgungsrisiko

Für alle genannten Rohstoffe werden die in Abschnitt 3.3.1 dargestellten Indikatoren berechnet, um das Versorgungsrisiko der Rohstoffe zu quantifizieren. Hierfür werden insbesondere die Daten aus dem Rohstoffinformationssystem ROSYS der Deutschen Rohstoffagentur, eines Bestandteils der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (DERA/BGR), sowie, wie bereits beschrieben, Daten der Weltbank verwendet (DERA 2018; World Bank 2017). Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 3-4 dargestellt.

	Statische Reichweite	HHI der Rohstoffförderung	HHI der Reserven	Politisches Länderrisiko	Regulatorisches Länderrisiko
Lithium	447 a	0,31	0,35	0,29	0,20
Kobalt	49 a	0,36	0,31	0,77	0,75
Nickel	37 a	0,10	0,13	0,53	0,44
Mangan	35 a	0,18	0,18	0,52	0,43
Aluminium	96 a	0,18	0,18	0,51	0,38
Eisen	59 a	0,22	0,19	0,44	0,34
Phosphor	258 a	0,32	0,54	0,69	0,46
Nat. Graphit	205 a	0,51	0,31	0,72	0,50
Erdöl	39 a	0,09	0,11	0,64	0,47
Titan	169 a	0,12	0,15	0,35	0,30
Platin	201 ⁴ a	0,56 ⁵	0,93	0,52	0,45
SEE	1.000 a	0,71	0,28	0,71	0,44
Kupfer	37 a	0,14	0,20	0,46	0,36

Tabelle 3-4: Betrachtung der Rohstoffe anhand verschiedener Indikatoren zur Quantifizierung des Versorgungsrisikos

© DERA 2018; World Bank 2017; USGS 2016b; Schmidt 2015

4 | Es finden sich kaum belastbare Quellen zu den Reserven der einzelnen Platingruppenmetalle, sondern nur für die Gruppe insgesamt. Daher wird an dieser Stelle eine Schätzung vorgenommen, mit dem die in Schmidt 2015 angegebenen länderspezifischen Platinkonzentrationen verrechnet wurden, woraus ein durchschnittlicher Platingehalt von rund 57 % in den PGM-Reserven resultiert.

5 | Aufgrund der erwähnten Datenverfügbarkeit wurde der HHI auf Basis der PGM-Reserven bewertet.

Für jeden der in Tabelle 3-4 dargestellten Indikatoren wird anhand des VDI-Verfahrens ein Wert von 0 bis 1 vergeben, wie bereits in Abschnitt 3.3.1 erläutert. Die Zuordnung der Indikatoren zu den jeweiligen Zahlenwerten ist in Tabelle 3-5 dargestellt.

Wert	Statische Reichweite	HHI der Rohstoffförderung	HHI der Reserven	Politisches Länderrisiko	Regulatorisches Länderrisiko
0	> 100 a	< 0,05	< 0,05	< 0,15	< 0,15
0,3	50–100 a	0,05–0,15	0,05–0,15	0,15–0,5	0,15–0,5
0,7	20–50 a	0,15–0,25	0,15–0,25	0,5–0,85	0,5–0,85
1	0–20 a	> 0,25	> 0,25	> 0,85	> 0,85

©VDI 2018

Tabelle 3-5: Schlüssel zur Vergabe des Wertes von 0 bis 1 anhand der ermittelten Indikatoren

Schließlich wird für jeden Rohstoff aus den Zahlenwerten der fünf Indikatoren mittels der in Abschnitt 3.3.1 dargestellten degressiven Addition ein Ergebnis ermittelt. Die Zahlenwerte und das zugehörige Ergebnis sind in Tabelle 3-6 dargestellt.

	Statische Reichweite	HHI der Rohstoffförderung	HHI der Reserven	Politisches Länderrisiko	Regulatorisches Länderrisiko	Ergebnis
Kobalt	0,7	1,0	1,0	0,7	0,7	0,89
Platin	0,0	1,0	1,0	0,7	0,3	0,79
SEE	0,0	1,0	1,0	0,7	0,3	0,79
Phosphor	0,0	1,0	1,0	0,7	0,3	0,79
Nat. Graphit	0,0	1,0	1,0	0,7	0,3	0,79
Lithium	0,0	1,0	1,0	0,3	0,3	0,73
Mangan	0,7	0,7	0,7	0,7	0,3	0,67
Aluminium	0,3	0,7	0,7	0,7	0,3	0,62
Nickel	0,7	0,3	0,3	0,7	0,3	0,56
Kupfer	0,7	0,3	0,7	0,3	0,3	0,56
Eisen	0,3	0,7	0,7	0,3	0,3	0,56
Erdöl	0,7	0,3	0,3	0,7	0,3	0,56
Titan	0,0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,28

Tabelle 3-6: Zahlenwerte der Indikatoren und Gesamtergebnis für das Versorgungsrisiko für jeden Rohstoff, ermittelt mittels degressiver Addition; angeordnet nach Höhe des Gesamtergebnisses

3.3.3 Ergebnisse für die Folgeschwere

Nach der Betrachtung des Versorgungsrisikos werden im Folgenden die Indikatoren zur Folgeschwere bei eingetretenerm Versorgungsengpass eines Rohstoffs betrachtet. Diese setzen sich aus einem Wert für die technischen und einem für die ökonomischen Auswirkungen zusammen, die ebenso über das Verfahren der degressiven Addition aggregiert werden.

Rohstoff	Einsatz	Technische Folgeschwere	Ökonomische Folgeschwere	Ergebnis
Lithium	Batterie	0,97	0,78	0,89
Platin	Brennstoffzelle	0,97	0,71	0,87
Nickel	Batterie: Kathode	0,86	0,68	0,79
C-Fasern	H ₂ -Speichertank	0,81	0,69	0,76
Kobalt	Batterie: Kathode	0,75	0,71	0,73
Epoxidharz	H ₂ -Speichertank	0,74	0,66	0,71
Kupfer	Kabelbaum	0,74	0,55	0,66
Mangan	Batterie: Kathode	0,74	0,46	0,63
Synth. Graphit	Batterie: Anode	0,73	0,34	0,57
SEE	Elektromotor	0,6	0,51	0,57
Nat. Graphit	Batterie: Anode	0,5	0,5	0,5
Phosphor	Batterie: Kathode	0,43	0,27	0,37
Aluminium	Batterie: Kathode	0,37	0,17	0,29
Kobalt	Brennstoffzelle	0,33	0,15	0,26
Synth. Graphit	Brennstoffzelle: Bipolarplatten	0,33	0,14	0,26
Eisen	Batterie: Kathode	0,25	0,17	0,22
Nat. Graphit	Brennstoffzelle: Bipolarplatten	0,3	0,0	0,18
Titan	Brennstoffzelle: Bipolarplatten	0,11	0,04	0,08

Tabelle 3-7: Zahlenwerte der Indikatoren und Gesamtergebnis für die Folgeschwere für jeden Rohstoff, ermittelt mittels degressiver Addition; angeordnet nach Höhe des Gesamtergebnisses

© DEFA 2016; World Bank 2017; USGS 2018b; Schmidt 2015

3.3.4 Darstellung der Ergebnisse und Identifikation der für die Anwendungen kritischen Rohstoffe

In Abbildung 3-5 werden die Ergebnisse für Versorgungsrisiko und Folgeschwere der untersuchten Rohstoffe dargestellt. Ziel der Kritikalitätsuntersuchung ist, die für die Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge kritischen Rohstoffe zu ermitteln, die dann in den folgenden Kapiteln eingehender untersucht werden.

Als Auswahlkriterium für eindeutig kritische Rohstoffe wurde angesetzt, dass die beiden Gesamtergebnisse für Folgeschwere und Versorgungsrisiko über 0,7 liegen. Dieser Bereich ist in Abbildung 3-5 rot markiert. Dieses Kriterium erfüllen Lithium und Kobalt für Batterie- sowie Platin für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge.

Die Materialien, deren Indikatoren für Folgeschwere und Versorgungsrisiko unter 0,7 liegen, aber 0,5 übersteigen, erscheinen weniger relevant. Von diesen werden die organi-

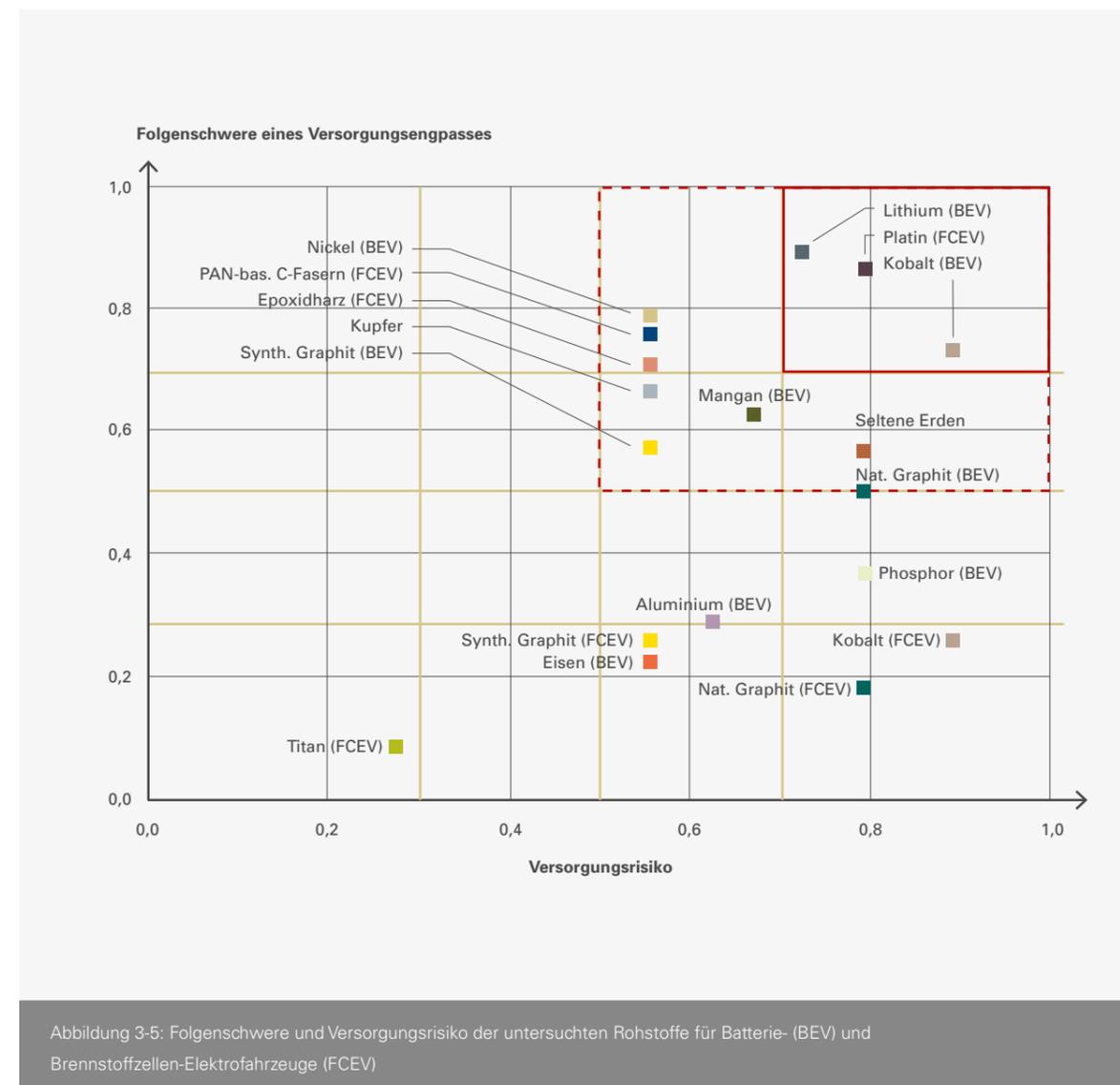


Abbildung 3-5: Folgeschwere und Versorgungsrisiko der untersuchten Rohstoffe für Batterie- (BEV) und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV)

schon Materialien (C-Fasern, Epoxidharz und Synth. Graphit) im Folgenden vernachlässigt, da sie hinsichtlich ihrer Produktionswege deutlich flexibler verfügbar sind. Neben Erdöl als Kohlenstoffquelle können auch Kohle, Erdgas oder andere Kohlenstoffträger verwendet werden. So sind auch biogene Quellen oder sogar das Abscheiden von Kohlenstoff aus der Atmosphäre denkbar.

Nickel soll hingegen aufgrund seiner steigenden Bedeutung als Kathodenmaterial trotz des Indikatorwertes für das Versorgungsrisiko unter 0,7 der folgenden detaillierten Analyse unterzogen werden. Auch die Seltenerdmetalle und Kupfer werden aufgrund ihrer Bedeutung für den Bau von Elektrofahrzeugen im Folgenden eingehend betrachtet.

Somit ergeben sich also sechs Rohstoffe, die für die Anwendung in der Elektromobilität als kritisch identifiziert werden und in den nachfolgenden Kapiteln unter verschiedenen Gesichtspunkten, wie Bereitstellung, Verwendung, Preisentwicklung, Umweltauswirkung, Rezyklierbarkeit und ethische Aspekte in der Bereitstellungskette, detailliert untersucht werden. Diese sind noch einmal in Tabelle 3-8 aufgelistet.

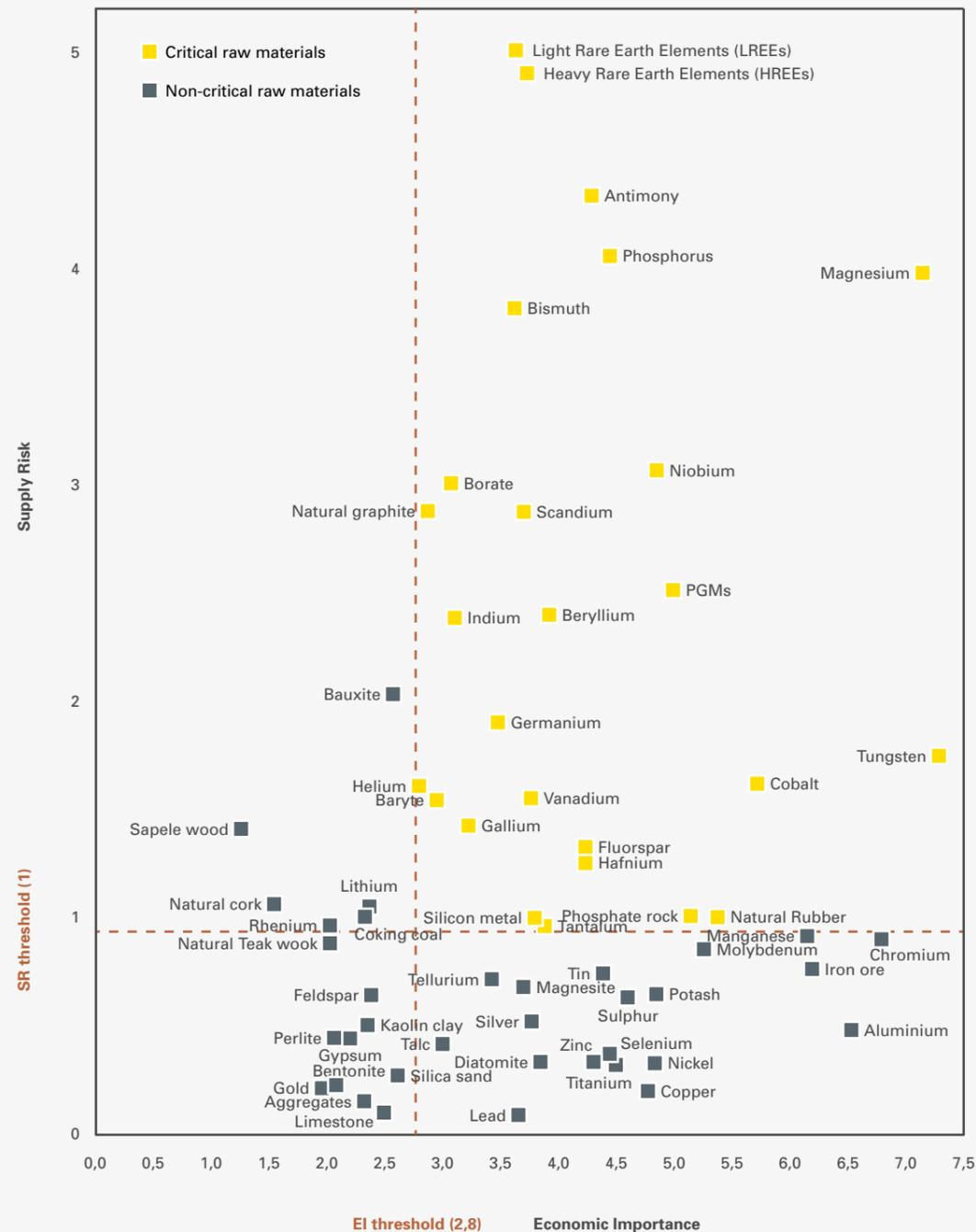
3.3.5 Vergleich der Ergebnisse mit anderen Kritikalitätsuntersuchungen

Wie bereits erwähnt ist eine Kritikalitätsuntersuchung ein gängiges Verfahren für einen Vergleich von Versorgungsrisiken und der Folgeschwere von Verknappungen mehrerer Rohstoffe. In einer regelmäßig aktualisierten Veröffentlichung der Europäischen Kommission über die Kritikalität verschiedener Rohstoffe wird ähnlich vorgegangen, allerdings wird neben dem Versorgungsrisiko („Supply Risk“) die wirtschaftliche Bedeutung („Economic Importance“) ermittelt (European Commission 2017a). Die Ergebnisse, die in Abbildung 3-6 dargestellt sind, sollen im Folgenden mit den Ergebnissen dieser Studie verglichen werden.

Zunächst sei auf den Unterschied der verwendeten Skala hingewiesen, diese wurde in der Darstellung der EU-Veröffentlichung von 0 bis 5 bzw. 0 bis 7,5 gewählt. Die Ermittlung der Ergebnisse basiert dabei auf der monopolistischen Struktur der Förderländer und deren politischer Struktur sowie auf der technischen Substituierbarkeit und Rezyklierbarkeit eines Rohstoffes. Daher können die Absolutwerte der Ergebnisse nicht miteinander verglichen werden, sondern lediglich die Verhältnisse der Bewertung der einzelnen Rohstoffe zueinander. Um als kritischer Rohstoff zu gelten, müssen in der Studie der Europäischen Kommission beide Werte über einer bestimmten Kritikalitätsschwelle liegen. Diese liegt für das Versorgungsrisiko (Supply Risk) bei 1,0 und für die Folgeschwere (Economic Importance) bei 2,8. Außerdem ist zu beachten, dass die beiden Achsen in der Darstellung vertauscht sind und insgesamt deutlich mehr Rohstoffe als in der vorliegenden Studie verglichen wurden.

Für die Anwendung in der Elektromobilität als kritisch identifizierte Rohstoffe
Lithium
Kobalt
Nickel
Platin und Platingruppenmetalle
Seltenerdmetalle: Neodym und Dysprosium
Kupfer

Tabelle 3-8: Anhand der Kritikalitätsuntersuchung ausgewählte Rohstoffe



© Entnommen aus European Commission 2017a

Abbildung 3-6: Versorgungsrisiko und wirtschaftliche Bedeutung verschiedener Rohstoffe

Kobalt wird auch in der Betrachtung der Europäischen Kommission als kritischer Rohstoff angesehen. Dabei ergibt sich insbesondere für die wirtschaftliche Bedeutung ein vergleichsweise hoher Wert. In der eigenen Methodik der vorliegenden Studie hingegen erreicht Kobalt für beide Indikatoren einen sehr hohen Wert.

Auch Platin bzw. Platingruppenmetalle werden in der Studie der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft. Dabei liegt das Versorgungsrisiko ungefähr in der Mitte der in der Studie verwendeten Skala, während sich die wirtschaftliche Bedeutung als höher darstellt. In der eigenen Kritikalitätsuntersuchung ergibt sich für beide Indikatoren ein hoher Wert von 0,79 bzw. 0,87.

Seltenerdmetalle (LREEs und HREEs) erreichen in der Studie der Europäischen Kommission den höchsten Wert für das Versorgungsrisiko und einen mittleren Wert für die wirtschaftliche Bedeutung. Somit werden sie als kritisch eingestuft. Eine ähnliche Situation stellt sich in den Ergebnissen der vorliegenden Studie dar. Für das Versorgungsrisiko wird ein hoher Wert von 0,79 errechnet, während sich für die Folgeschwere ein Wert von 0,57 ergibt.

Lithium wird in der EU-Studie als nicht kritischer Rohstoff erachtet. Zwar überschreitet der Indikatorwert für das Versorgungsrisiko den gesetzten Grenzwert, doch wird seine Wichtigkeit als nicht ausreichend hoch eingeschätzt. Hier fällt der unterschiedliche Fokus gegenüber der vorliegenden Studie auf, in der die Folgeschwere anhand der konkreten Nutzung in Batterie-Elektrofahrzeugen untersucht wird.

Kupfer und Nickel werden in der Studie der Europäischen Kommission nicht als kritische Rohstoffe angesehen. Während ihrer wirtschaftlichen Bedeutung ein vergleichsweise hoher Wert (über der definierten Kritikalitätsschwelle) zukommt, ergibt sich für das Versorgungsrisiko ein eher geringerer Wert. Auch in der vorliegenden Studie ergibt sich für das Versorgungsrisiko beider Materialien mit 0,56 ein verhältnismäßig geringer Wert.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die Einschätzungen der Studie der Europäischen Kommission mit den Ergebnissen der Studie grundsätzlich decken, auch wenn bei der Einschätzung der Folgeschwere (bzw. der Economic Importance) die unterschiedlichen Perspektiven der Betrachtung deutlich werden.



© Skyhobo/stockphoto



04

**Bereitstellung und Verwendung
der als kritisch identifizierten
Rohstoffe**

04

Bereitstellung und Verwendung der als kritisch identifizierten Rohstoffe



Dieser Abschnitt enthält die Beschreibung der Bereitstellungsketten der in Kapitel 3 als kritisch identifizierten Rohstoffe. Dabei werden Fragen der rohstofflichen (Erz-)Förderung in ihrem globalen Kontext ebenso betrachtet wie solche zu weiterverarbeitenden Schritten. Daneben wird die globale Verwendung jedes Rohstoffs anhand der Sektoren betrachtet, in denen er eingesetzt wird.

4.1 Lithium

4.1.1 Bereitstellung

Grundsätzlich lässt sich Lithium heutzutage aus zwei unterschiedlichen Quellen wirtschaftlich gewinnen: aus Solevorkommen (wie z. B. in Chile und Argentinien) und aus Festgesteinsvorkommen (wie z. B. in Australien, Kanada und Simbabwe) (Schmidt 2017). Relevante Solevorkommen sind in Salzseen (Salaren) zu finden. Der Salar de Atacama weist

mit ca. 1.600 ppm einen sehr hohen Lithiumgehalt auf. Neben der eigentlichen Lithiumkonzentration bildet aber auch der Grad an „Verunreinigung“ mit anderen Elementen (wie beispielsweise Magnesium) einen wichtigen Faktor für die Wirtschaftlichkeit der Lithiumgewinnung (Schmidt 2017).

Eine Aufteilung der für die Lithiumgewinnung wichtigsten Mineralien mit Lithiumgehalt ist in Tabelle 4-1 abgebildet. Spodumen, Petalit, Lepidolith und Amblygonit sind Vertreter der Pegmatite und stellen aufgrund der hohen Lithiumgehalte besonders relevante Lithiumquellen dar.

Weitere Gewinnungsmöglichkeiten bestehen u. a. in der Verwendung von lithiumhaltigen Tonen und Glimmer (Schmidt 2017). Da diese bei der aktuellen Marktsituation jedoch eine nebensächliche Rolle spielen, werden sie nicht näher betrachtet. Tabelle 4-2 fasst die wichtigsten Förderländer und ihren Weltmarktanteil gemeinsam mit der entsprechenden Lithium-

Minerale	Formel	Li-Gehalt	Ø Li-Gehalt Erze
Spodumen	LiAlSi ₂ O ₆	1,9–3,7 %	1,35–3,6 %
Petalit	LiAlSi ₄ O ₁₀	1,6–2,3 %	1,4–2,2 %
Lepidolith	K(Li,Al) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (F,OH) ₂	1,4–3,6 %	1,4–1,9 %
Amblygonit	(Li,Na) ₃ AlPO ₄ (F,OH)	3,4–4,7 %	k.A.

Tabelle 4-1: Beispiele für Minerale mit Lithiumgehalt

herkunft zusammen. Für diese sowie die nachfolgenden Betrachtungen wurden in aller Regel die aktuellsten Angaben aus dem Rohstoffinformationssystem ROSYS der DERA/BGR entnommen (DERA 2018).

Land	Förderung 2015 (ROSYS)	Anteil an globaler Förderung	Lithiumquelle
Australien	13.642 t	43 %	Spodumen
Chile	10.599 t	33 %	Sole
Argentinien	3.608 t	11 %	Sole
China	2.000 t	6 %	Spodumen, Lepidolith, Sole
Welt	32.119 t	100 %	

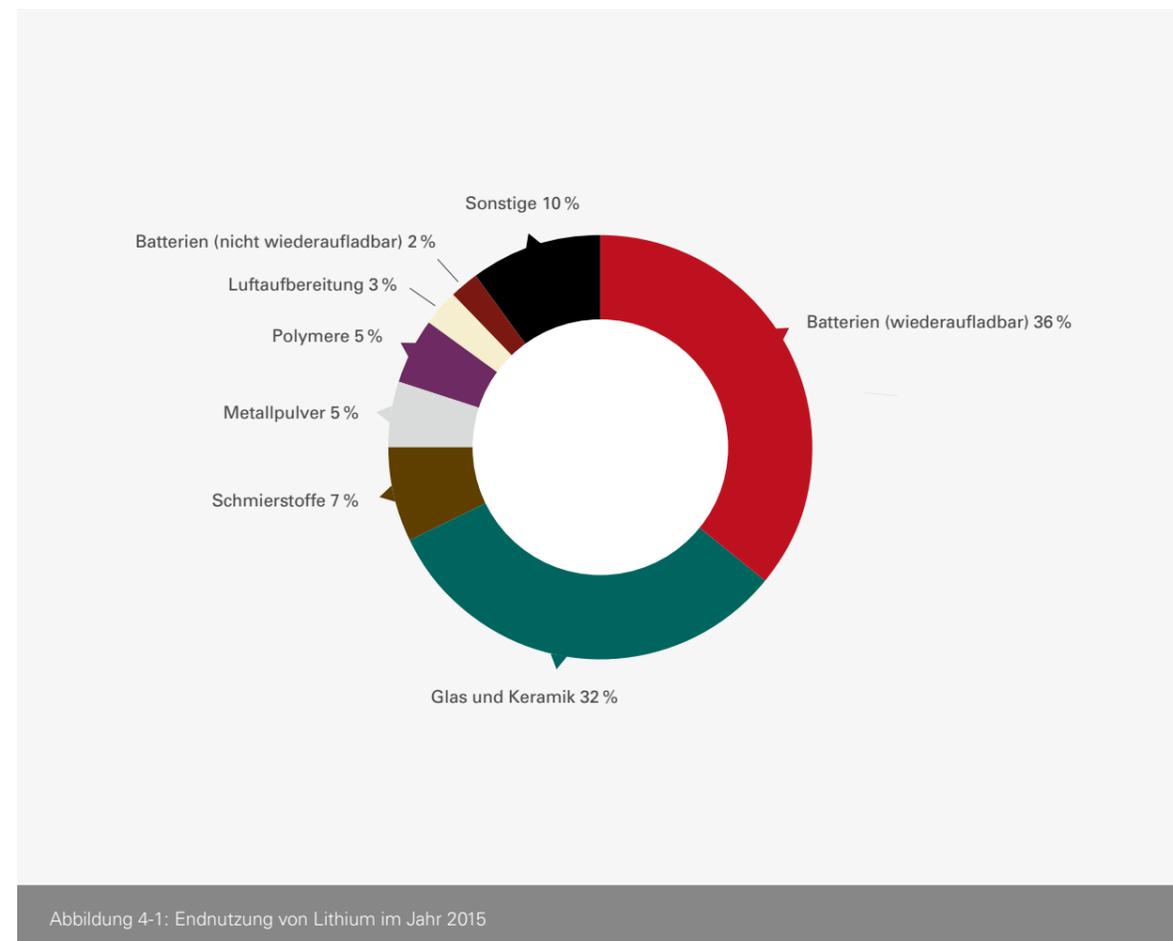
Tabelle 4-2: Wichtigste Förderländer für Lithium

Für die Importe von lithiumhaltigen Verbindungen in die EU ist Chile der wichtigste Handelspartner (European Commission 2017b). Das aus Sole stammende Lithium wird durch Bohrlöcher gefördert und in mehreren nacheinander zu durchlaufenden Evaporationsbecken durch Sonnenenergie aufkonzentriert. Durch die Nutzung der erneuerbaren Energieform ist dieser Prozess sehr preisgünstig, kann aber bis zu 18 Monate in Anspruch nehmen (Schmidt 2017). Nach der Abtrennung von Verunreinigungen in den Evaporationsbecken wird das Lithium anschließend in einer etwa 5–10 % lithiumhaltigen Lösung an die Küste transportiert und in einer großtechnischen Anlage weiter aufkonzentriert. Lithium wird aus Spodumen in der Regel durch den Acid-Roast-Prozess gewonnen, zu dem zahlreiche Modifikationen existieren. Aus dem genannten Prozess wird Lithiumcarbonat gewonnen, das durch Ionenaustauschprozesse auf die für die Batterieindustrie notwendige Reinheit von über 99,5 % konzentriert wird (Schmidt 2017).

Lithium wird in aller Regel zunächst zu Lithiumcarbonat verarbeitet, aus dem anschließend weitere Verbindungen wie Lithiumhydroxid, Lithiumbromid, Lithiumsulfat oder auch Lithiumchlorid gewonnen werden können. Die Konzentration von lithiumhaltigen Solen erfolgt in aller Regel in geographischer Nähe zur Förderstätte, wohingegen lithiumhaltige Mineralkonzentrate in der Regel im asiatischen Raum zu Lithiumcarbonat oder Lithiumhydroxid aufbereitet werden (Kudryavtsev 2018, European Commission 2017b).

4.1.2 Verwendung

Abbildung 4-1 zeigt die Endnutzung von Lithium im Jahr 2015. Aufgrund des hohen Betrags des Standardpotenzials des Elements (Lithium steht an unterster Stelle der elektrochemischen Spannungsreihe) lassen sich hohe Zellspannungen realisieren. In Kombination mit der hohen Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien sind diese eine sehr geeignete Technologie für mobile und portable Anwendungen. Diese Batterien stellen auch mit 38 % die Hauptanwendung von Lithium dar. Hiervon entfallen 36 % auf wiederaufladbare Batterien. Den zweitgrößten Anteil des weltweit genutzten Lithiums bilden Glas- und Keramikanwendungen mit insgesamt 32 %. Weiterhin wird Lithium in Pulverform (meist in der Gussindustrie) sowie als Bestandteil von Schmierstoffen und Polymeren verwendet (Schmidt 2017).



© nach Schmidt 2017

4.2 Kobalt

4.2.1 Bereitstellung

Kobalt kommt in der Natur nicht gediegen vor, also nicht als reines Metall, sondern stets in Verbindungen, wie z. B. Kobaltglanz, Skutterudit oder Erythrit. Es gibt vier für Kobalt relevante geologische Vorkommen: Sedimentgesteinsvorkommen, hydrothermale und vulkanische Vorkommen, magmatische Sulfidvorkommen sowie Lateritvorkommen. Darüber hinaus gibt es auch auf Meeresböden erhebliche Kobaltvorkommen in Form kobaltreicher Krusten, die jedoch aktuell nicht abgebaut werden (European Commission 2017b). Tabelle 4-3 zeigt die wichtigsten Förderländer für Kobalt und deren Anteil an der globalen Förderung, die im Jahr 2015 rund 144.000 t betrug. Mit 59 % weist die Demo-

Land	Förderung 2015 (ROSYS)	Anteil an globaler Förderung	Kobaltquelle
DR Kongo	84.401 t	59 %	Sulfidlagerstätten im Sedimentgestein
China	10.093 t	7 %	Sulfidlagerstätten
Kanada	6.904 t	5 %	Magmatische Sulfidlagerstätten
Australien	6.777 t	5 %	Magmatische Sulfidlagerstätten
Welt	143.669 t	100 %	-

Tabelle 4-3: Wichtigste Förderländer für Kobalt

© Al Barazi et al. 2017, DERA 2018

kratische Republik (DR) Kongo mit Abstand den größten Anteil an der globalen Minenförderung auf. Der Kleinbergbau spielt hier eine große Rolle und hatte in den Jahren 2015 und 2016 einen Anteil von ca. 20 % an der inländischen Förderung (Al Barazi et al. 2017).

Mit 98 % findet der Großteil der Kobaltproduktion als Nebenprodukt von Nickel oder Kupfer statt (Green 2017; European Commission 2017b). Lediglich in einem marokkanischen Kobaltvorkommen wird das Metall als Hauptprodukt aus einer Kobalt-Arsen-Lagerstätte abgebaut (Trueb 2005).

Zur Gewinnung von Kobalt gibt es grundsätzlich die hydro- und die pyrometallurgische Gewinnung sowie ein weiteres modernes Verfahren, bei dem das Metall in einem dampfförmigen Zustand aus dem Erz gewonnen wird. Bei der hydro-metallurgischen Gewinnung findet meist die sogenannte Pressure-Acid-Leach-(PAL-)Technik Anwendung. Hierzu wird das schlammartige Erz vorgeheizt und bei hoher Temperatur und unter hohem Druck mit konzentrierter Schwefelsäure zusammengebracht. Nach ca. 90 Minuten bilden sich das eigentliche Hauptprodukt des Prozesses Nickel sowie darüber hinaus Kobalt als Metallsulfate in löslicher Salzform. Nach dem Abtrennen des Primärmetalls gibt es verschiedene Verfahren, um schließlich Kobalt zu gewinnen, wie z. B. die Solventextraktion oder Heap Leaching.

Die pyrometallurgischen Verfahren, wie z. B. das Flash Smelting, werden meist für magmatische Sulfidvorkommen verwendet. Die Form der Gewinnung, bei der das Metall dampf-

förmig unter Zuhilfenahme chemischer Prozesse aus dem Erz gewonnen wird, findet vor allem für lateritische Vorkommen Verwendung (British Geological Survey 2009). Wie in Tabelle 4-3 zu sehen, kommt Kobalt in den vier größten Förderländern jedoch als Sulfid vor.

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach dem Metall wurde begonnen, die Reststoffe der Kupferherstellung, deren Kobaltgehalt in den 1950er-Jahren wirtschaftlich nicht attraktiv war, erneut zu bearbeiten, um Kobalt zu gewinnen (British Geological Survey 2009).

Ein Großteil von Chinas Kobaltbereitstellung basiert auf importierten Konzentraten aus den Erzvorkommen der DR Kongo, was China wiederum eine höhere Bedeutung hinsichtlich Kobalt zukommen lässt. Laut einem Bericht der Webseite Research and Market investieren chinesische Firmen in Minenprojekte in der DR Kongo, um eine stabile Lieferung zu gewährleisten (PR Newswire 2018). Die Kobalt-Raffinaderzeugung, die 2015 weltweit 100.688 t betrug, findet zu einem Großteil in China statt (48 %). An zweiter und dritter Stelle stehen Finnland (9,1 %) sowie Belgien (6,3 %), gefolgt von Kanada (5,6 %) (DERA 2018). Während innerhalb der EU Finnland das einzige Land ist, das Kobalt in nennenswerten Mengen bergmännisch abbaut, wird das finale Metall nicht nur in Finnland, sondern auch in Belgien und Frankreich produziert (European Commission 2017a, 2017b). Aufgrund der damit verbundenen Mengen kommt dem Kobaltbereitstellungspfad ausgehend von der DR Kongo nach China besondere Bedeutung zu.

4.2.2 Verwendung

Aus Abbildung 4-2 wird deutlich, dass Batterien mit 44 % den größten Anteil der weltweiten Kobaltnutzung ausmachen. Hierzu gehören Batterien in Laptops, Smartphones und anderen elektronischen Geräten sowie vermehrt Batterien in Elektrofahrzeugen und stationären Stromspeichern. Kobalt spielt dort als Bestandteil der Kathodenstruktur eine wesentliche Rolle. Weitere 17 % werden in Superlegierungen, hauptsächlich in Hochtemperaturanwendungen, eingesetzt. Hartmetalle, die überall dort zum Einsatz kommen, wo eine hohe Verschleißfestigkeit gefordert ist, stellen mit 9 % eine weitere wichtige Anwendung dar. Kobalt fungiert hier meist als Binder (Durit Hartmetall GmbH 2018). Des Weiteren wird Kobalt als Bestandteil von Katalysatoren, Magneten (insb. Samarium-Cobalt) und Färbemitteln eingesetzt.

4.3 Nickel

4.3.1 Bereitstellung

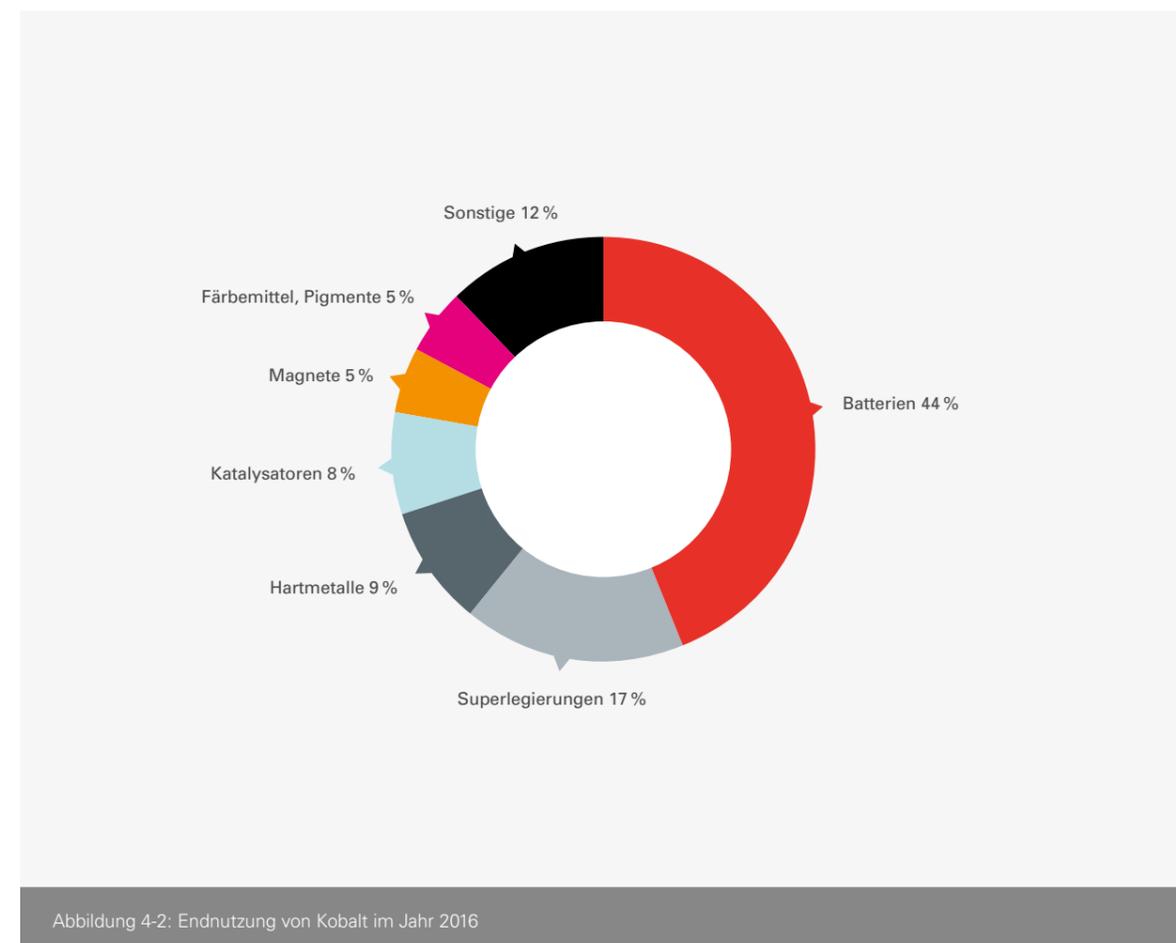
Nickelvorkommen finden sich im Wesentlichen in magmatischen Sulfiden und lateritischen Erzen (Gocht 1974). Der Großteil der relevanten magmatischen Sulfide, die hauptsächlich in vulkanischem Gestein in Russland, Südafrika, Kanada und Australien zu finden sind, hat einen Nickelanteil zwischen 0,2 und 2,0 %. Weitere Bestandteile sulfidischer Erze sind PGM, Kobalt und Kupfer. Lateritische Erze sind meist durch Verwitterung entstanden und vorwiegend in den (sub-)tropischen Regionen wie zum Beispiel den Philippinen, Neukaledonien, Indonesien und Kolumbien zu finden. Nickel liegt dort meist in oxidischen Mineralien mit einem mittleren Anteil von 1–1,6 % vor (Nickel Institute 2018; European Com-

mission 2017a). Je nach Typ (lateritisches oder sulfidisches Erz), Qualität (Verunreinigungen) und Herkunft des Erzes werden nach dessen Förderung mehrere Flotationsschritte sowie unterschiedliche hydro- und pyrometallurgische Verfahren zur Aufbereitung des Nickelkonzentrats angewendet (European Commission 2017a). Ohne weitere Aufbereitung werden die entstandenen Produkte als Class-II-Nickel (< 99,8 % Ni), in Form von Ferronickel oder auch „Nickel Pig Iron“ (NPI, hauptsächlich in China) zur Herstellung von Edelstahl genutzt.

Aufgrund der hohen Reinheitsanforderungen an Nickel für die Produktion von Batterien kommt hier nur Class-I-Nickel in Frage. Theoretisch kann auch Class-II-Nickel über aufwendige Aufbereitungsschritte zu Class-I-Nickel veredelt werden, dies ist aktuell jedoch wirtschaftlich weniger attraktiv (Webb 2018).⁶ Aufgrund dessen wird erwartet, dass in naher Zukunft der Bedarf an Nickel für die Batterieherstellung über Class-I-Nickel bedient wird (McKinsey 2017).

Die Nickelkonzentrate, die für die Herstellung von Class-I-Nickel verwendet werden, stammen hauptsächlich aus sulfidischen Erzen (Nickel Institute 2018). Diese werden nach der Aufbereitung zu Nickelkonzentraten über weitere Prozessschritte zu Nickelanoden aufkonzentriert. Anschließend erfolgt in aller Regel ein Elektrolyseprozess, der die Reinheit des Nickels weiter erhöht. Class-I-Nickel zeichnet sich durch einen hohen Nickelgehalt (> 99,8 % Ni) und eine damit einhergehende hohe Reinheit aus. Class-I-Nickel umfasst in etwa 55 % der Förderung und wird u. a. in Form von elektrolytischem Nickel, Nickelpulver und -briketts an Metallbörsen (z. B. LME) gehandelt (Nickel Institute 2016b; Pariser 2017).

In den meisten Ländern werden Nickelerze direkt vor Ort zu Nickelkonzentraten bzw. zu sog. Nickelstein⁷ weiterverarbeitet. Einige südostasiatische Länder exportieren die Nickelerze und/oder Nickelstein zur Weiterverarbeitung jedoch u. a. nach Japan, China und Korea, die große Raffineriekapazitäten haben. Auch einige europäische Staaten wie Norwegen, Finnland und Großbritannien haben bedeutende Raffineriekapazitäten, obwohl dort keine Nickelerze abgebaut werden. Tabelle 4-4 fasst die wichtigsten Förderländer für Nickel sowie die dort genutzte Nickelquelle zusammen.



Land/Region	Förderung 2015 (ROSYS)	Anteil an globaler Förderung	Nickelquelle
Philippinen	418.292 t	20 %	Lateritische Erze
Russland	261.000 t	13 %	Sulfidische Erze
Kanada	234.519 t	11 %	Sulfidische Erze
Australien	229.381 t	11 %	Lateritische und sulfidische Erze
Neukaledonien	186.100 t	9 %	Lateritische Erze
Indonesien	129.751 t	6 %	Lateritische Erze
China	101.400 t	5 %	Lateritische Erze

Tabelle 4-4: Wichtigste Förderländer/-regionen für Nickel

© British Geological Survey 2009; Nickel Institute 2016b; DEFA 2018

⁶ | Limonite (eine Untergruppe der Laterite) können ebenfalls zu Class-I-Nickel aufbereitet werden. Dies geschieht dann meist über Laugungsverfahren, was mit einem hohen Einsatz von Chemikalien verbunden ist (Pariser 2017; Webb 2018).

⁷ | Nickelstein bezeichnet ein aus Erzen oder Nickelkonzentraten hergestelltes Zwischenprodukt mit höherem Nickelgehalt (Nickel Consortia 2018).

4.3.2 Verwendung

Wie in Abbildung 4-3 dargestellt ist, werden gut zwei Drittel (68 %) des weltweit produzierten Nickels zur Herstellung von Edelstahl verwendet. Dies umfasst sowohl das bereits erwähnte Class-I-Nickel als auch Metalle mit geringerem Nickelgehalt wie Ferronickel oder NPI. Des Weiteren ist Nickel als Legierungselement in Stahllegierungen (16 %) zu finden. Galvanische Nickelbeschichtungen, die z. B. zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit eines Werkstoffs eingesetzt werden, stellen mit 9 % eine weitere Anwendung von Nickel dar. Nur ein geringer Anteil der weltweiten Nickelnutzung entfiel auf Batterien (McKinsey 2017).

4.4 Platin

4.4.1 Bereitstellung

Platin gehört zu den Platingruppenmetallen (PGM), zu denen auch Ruthenium, Rhodium, Palladium, Osmium und Iridium (nach aufsteigendem Atomgewicht) zählen, und stellt eines der wirtschaftlich wichtigsten Platingruppenmetalle dar (Schmidt 2015).

Die Platingruppenmetalle kommen hauptsächlich in magmatischen Lagerstätten vor. Diese enthalten entweder PGM-dominierte Erze, die geringe Anteile an Basismetallsulfiden enthalten, oder Nickel-Kupfer-dominierte Erze, aus denen sich die PGM als Beiprodukte gewinnen lassen (Schmidt 2015). Entsprechend gibt es zwei grundsätzliche Arten zur

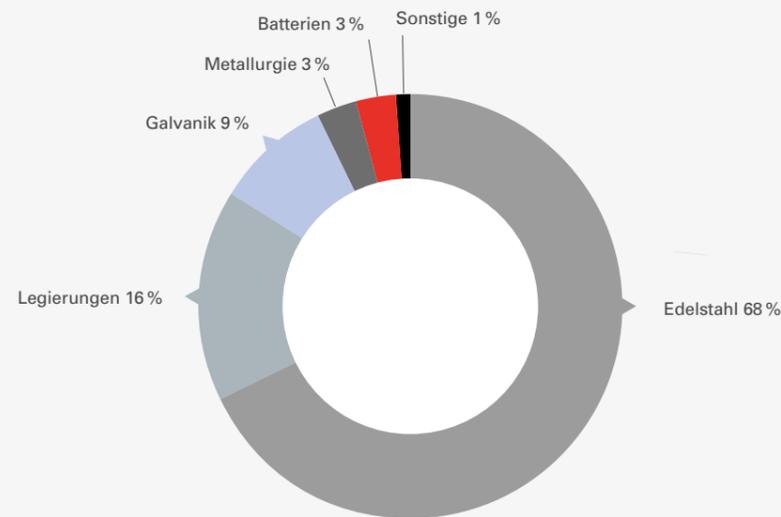


Abbildung 4-3: Endnutzung von Nickel im Jahr 2017

© Natural Resources Canada 2018

Land	Förderung 2013	Anteil an globaler Förderung	Platinquelle
Südafrika	137,6 t	73 %	PGM-dominierte Erze
Russische Föderation	24,2 t	13 %	Ni-Cu-dominierte Erze
Simbabwe	11,6 t	6 %	PGM-dominierte Erze
Kanada	6,1 t	3 %	PGM- und Ni-Cu-dominierte Erze
Welt	187,9 t	100 %	

Tabelle 4-5: Wichtigste Förderländer für Platin

© Schmidt 2015

Bereitstellung von PGM. Aufgrund der chemischen Ähnlichkeit der PGM finden sich diese immer vergesellschaftet in einem Erz (insb. Platin und Palladium), wobei die Zusammensetzung variiert (Schmidt 2015). Je nach Erz finden sich PGM häufig in Verbindung mit Nickel, Kobalt und Kupfer, aber auch mit Gold oder Silber; gediegen kommen die PGM hingegen selten vor (Schmidt 2015). Die PGM-dominierten Erze treten insbesondere in Südafrika auf, die Nickel-Kupfer-dominierten Erze in der Russischen Föderation (Schmidt 2015). Tabelle 4-5 zeigt die wichtigsten Förderländer und ihren Anteil an der globalen Platinförderung.

Die globale Förderung betrug 2013 187,9 t Platin. Die gelisteten vier Länder verzeichnen mit 183,2 t auf sich einen Anteil von 95,6 % der globalen Produktion.

Südafrika stellt mit einem Anteil von 73 % zweifelsohne das wichtigste Förderland für Platin dar. Der Bushveld-Komplex ist die weltweit wichtigste Lagerstätte PGM-dominierter Erze. Der Komplex hat eine Ausdehnung von ca. 450 km in Ost-West- und ca. 350 km in Nord-Süd-Richtung (Schmidt 2015). Er ist für PGM-dominierte Vorkommen insofern von großer Bedeutung, als die Erzgehalte hier 1,3–3,3 g/t betragen und ihnen somit besondere wirtschaftliche Bedeutung beigemessen wird. Es gibt drei sogenannte „Reefs“, also erzführende Schichten: das Merensky Reef, das UG2 Chromitite Reef sowie das Platreef. Das Merensky-Erz weist einen durchschnittlichen Plattingehalt von 3,25 g/t auf, das UG2-Erz von 2,46 g/t (UG2) und das Platreef-Erz nur 1,26 g/t (Jones 2005).

Weiterhin sind PGM-dominierte Erze in den Lagerstätten Great Dyke in Simbabwe, dem Stillwater-Komplex in den USA und dem Lac-des-Îles-Komplex in Kanada zu finden. Nickel-Kupfer-dominierte Erze kommen hingegen in Russland und auch in Kanada vor. Während die Lagerstätte Sudbury in Kanada ein Platin-Palladium-Verhältnis von 0,5 aufweist, liegt das Verhältnis in der Norilsk-Talnakh-Lagerstätte in der Russischen Föderation bei 0,3. Die südafrikanischen Lagerstätten, insbesondere das Merensky und das UG2 Reef, enthalten dagegen einen vergleichsweise deutlich höheren Platinanteil (Schmidt 2015).

Aufgrund des hohen Anteils Südafrikas an der weltweiten Förderung von Platin werden die Verarbeitung und Gewinnung anhand des Beispiels Südafrikas erläutert. In einem ersten Schritt werden die gefördert Roherze sortiert, gebrochen, gemahlen, nach Schwere getrennt und mithilfe von Flotationsverfahren aufkonzentriert. Dies geschieht in der Nähe der Lagerstätte. Im Anschluss wird das Erz in Elektrosmelzöfen bei 1.350–1.600 °C verhüttet. Das Ergebnis dieses Prozesses ist dann ein Rohstein, der die PGM sowie Eisen, Gold, Kobalt, Kupfer, Nickel und Schwefel enthält (Schmidt 2015).

Im nächsten Oxidationsprozess werden Schwefel und Eisen entfernt und die nun entstandene Konvertermatte, das sogenannte „White Metal“, wird gemahlen oder granuliert. Das aufkonzentrierte Erz wird mithilfe mehrerer hydrometallurgischer und elektrolytischer Extraktionsverfahren zum Metall

aufbereitet. Schließlich liegen Platin, Palladium und Gold in 99,95 %iger Konzentration vor (Schmidt 2015; European Commission 2017b).

Hinsichtlich der relevanten Unternehmen ist Anglo American der größte Platinförderer und -produzent in Südafrika und betreibt 13 Konzentrationsanlagen jeweils nahe der 13 Minen sowie drei zentrale Hütten und schließlich zwei Raffinerien. Die Raffinerien befinden sich alle in Rustenburg, das im Nordosten Südafrikas liegt. 2013 betrug der Marktanteil von Anglo American 31 %. Weiterhin hatten die südafrikanischen Unternehmen Impala Platinum sowie Lonmin 2013 Marktanteile von jeweils 16 % bzw. 9 %. Das russische Unternehmen Norilsk hat einen Weltmarktanteil von 26 % und ist zugleich das einzige bedeutende russische Unternehmen auf dem Markt der PGM (Anglo American 2015b).

4.4.2 Verwendung

Platin wird heute hauptsächlich als Katalysator in Abgasnachbehandlungssystemen, in erster Linie von Dieselfahrzeugen, eingesetzt (Johnson Matthey 2018; Schmidt 2015). Mit 36 % stellt dies den größten Anwendungsbereich dar. Neben der Automobilindustrie setzt auch die chemische Industrie Platin als Katalysatormaterial ein. Hierauf entfallen etwa 6 % des gesamten Platinbedarfs. Die Endnutzung von Platin ist in Abbildung 4-4 dargestellt.

Auffallend ist der hohe Anteil an nichttechnischen Anwendungen am Gesamtbedarf von Platin. 35 % werden in Form von Schmuck eingesetzt, weitere 10 % werden als Investitionsgut gehandelt, wobei der Anteil dieser beiden Verwendungen zuletzt zurückging (Johnson Matthey 2018).

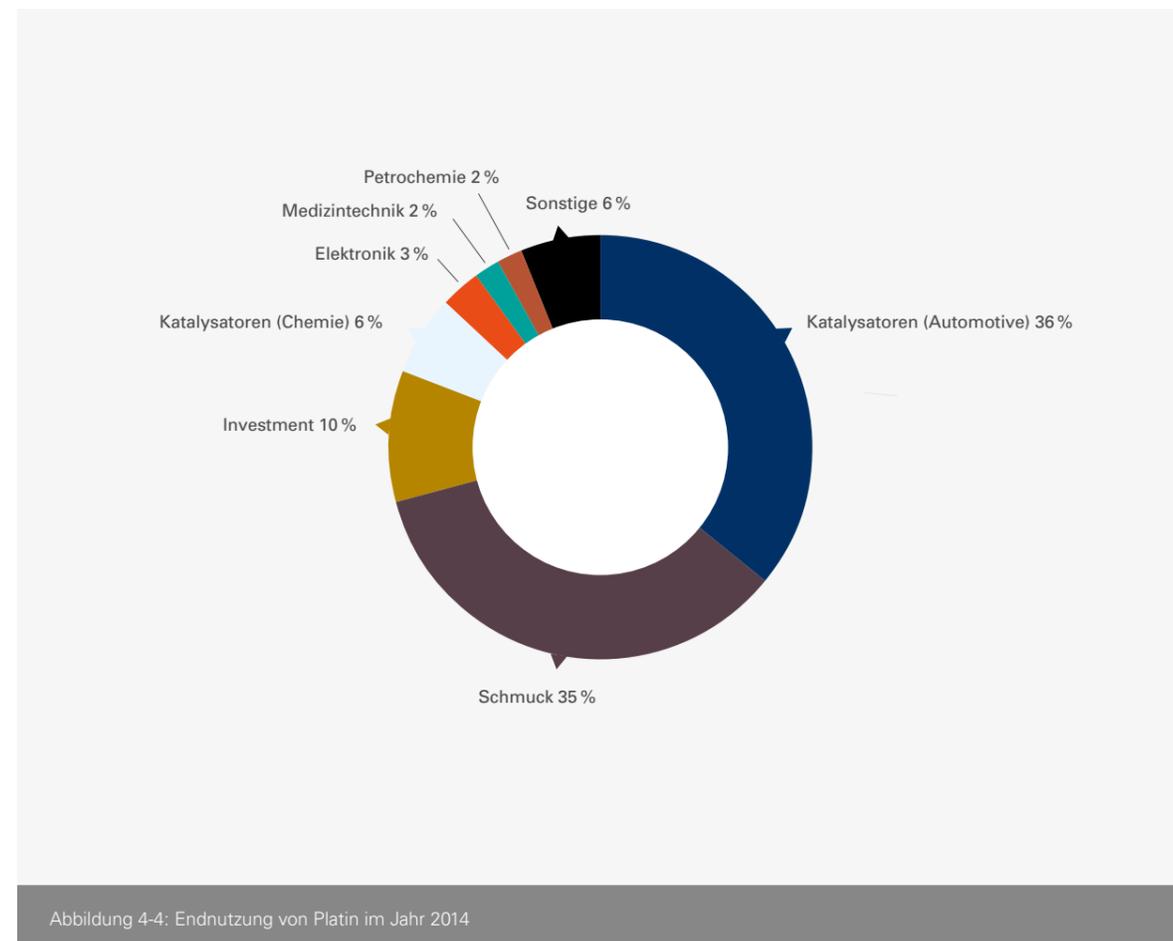


Abbildung 4-4: Endnutzung von Platin im Jahr 2014

4.5 Seltenerdmetalle

4.5.1 Bereitstellung

Für die Bereitstellung von Seltenerdmetallen (SEM) sind nur wenige Länder von Relevanz, wobei China unter diesen eine herausragende Stellung einnimmt. Häufig wird zwischen leichten und schweren Seltenerdelementen (SEE) unterschieden, wobei die Einteilung nicht immer eindeutig ist⁸ (Schüler et al. 2011).⁹ Aufgrund ihrer chemischen Ähnlichkeit kommen verschiedene SEE in gemeinsamen Vorkommen vergesellschaftet vor und werden daher immer gemeinsam abgebaut. Entgegen ihrem Namen sind die Elemente vergleichsweise häufig in der Erdkruste vertreten. So ist Cer beispielsweise häufiger als Kupfer und Zink und selbst Thulium, das seltenste der SEE, ist häufiger in der Erdkruste zu finden als Silber. Allerdings sind sie nur selten in wirtschaftlich abbaubaren Vorkommen zu finden, wobei die leichten SEE deutlich häufiger sind als die schweren (Trueb 2005).

Die chinesische Bayan-Obo-Mine in der Inneren Mongolei, auf die ca. 60 % der weltweiten Förderung von leichten SEE zurückgehen, sowie die Förderstätte Mountain Pass in den USA nutzen Bastnäsit als Ausgangsmineral. Die Förderaktivitäten im russischen Lovozero basieren hingegen auf Loparit. Des Weiteren existieren Förderstätten, in denen SEE beispielsweise aus Monazit als Nebenprodukt von Rutil, Ilmenit und Weiteren gewonnen werden. Darüber hinaus gibt es Xe-

notim und Ionen-Adsorptionstone, in denen insbesondere schwere SEE vorhanden sind und die insbesondere in Südchina vorkommen. Diese werden häufig im Kleinbergbau abgebaut, wofür viel manuelle Arbeit erforderlich ist, die Förderung beträgt insgesamt aber 98 % der weltweiten Förderung an schweren SEE. Seltenerdmetalle werden zumeist im Tagebau gefördert, für den Abbau existieren verschiedene Prozessverfahren (European Commission 2017b).

In einem ersten Schritt wird das Erz zu einem Konzentrat aufbereitet, das eine Mischung von Seltenerdoxid (SEO) enthält. Zwar kann dieses Erz bereits verkauft werden, doch findet zunehmend die direkte Weiterverarbeitung in vertikal integrierten Firmen statt. Die weitere Aufbereitung führt zu SEE-Verbindungen, wie beispielsweise Carbonaten, Nitraten und Chloriden. Diese Produkte können dann direkt an Endnutzer verkauft werden (z. B. Hersteller von Katalysatoren) (European Commission 2017b). Die Separation zielt darauf ab, einzelne SEE-Verbindungen in einer Reinheit von 99,9 % und höher zu erhalten. Aufgrund der chemischen Ähnlichkeit der verschiedenen SEE (Trueb 2005) ist dieser Schritt technisch sehr aufwändig und mit entsprechend hohen Kosten verbunden. Die Prozesskette kann eine hohe Anzahl von Trennstufen enthalten und nutzt zahlreiche hydro- sowie pyrometallurgische Schritte.

Tabelle 4-6 zeigt die wichtigsten vier Förderländer der Seltenerdmetalle sowie deren Anteil an der globalen Förderung.

Land	Förderung 2015 (ROSYS)	Anteil an globaler Förderung
China	105.000 t	84 %
Australien	8.799 t	7 %
USA	5.900 t	5 %
Russische Föderation	2.800 t	2 %
Welt	125.574 t	100 %

Tabelle 4-6: Wichtigste Förderländer für Seltenerdmetalle

© DERA 2018

⁸ | Die leichten SEE sind im Rahmen dieser Studie: Scandium, Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium (hierzu existiert kein stabiles Isotop), Samarium und Europium. Die schweren SEE sind im Rahmen dieser Studie: Yttrium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium und Lutetium.

⁹ | Die sog. Harkin-Regel besagt, dass SEE mit geraden Ordnungszahlen häufiger in der Erdkruste als ihre Nachbarn im Periodensystem mit ungeraden Ordnungszahlen vorkommen. Jedoch zeigt sich dies nicht für das Vorkommen in wirtschaftlich abbaubaren Lagerstätten. Hier kommen die leichten SEM häufiger vor als die schweren (Marscheider-Weidemann et al. 2016).

4.5.2 Verwendung

Abbildung 4-5 zeigt, dass etwa ein Drittel (31 %) der Seltenerdmetalle zur Herstellung von Permanentmagneten verwendet werden. Hierfür sind insbesondere die leichten SEE Neodym und Praseodym relevant, wobei in geringeren Mengen auch Dysprosium (oder in noch geringerem Maße Terbium) eingebracht wird, um die Koerzitivfeldstärke und die Wärmebeständigkeit von Magneten zu verbessern (Voncken 2016; Marscheider-Weidemann et al. 2016). Katalysatoren bilden mit 18 % eine weitere wichtige Anwendung. Hauptsächlich werden hier Cer, Lanthan und Yttrium verwendet (Merkel 2012). Des Weiteren werden Seltenerdmetalle als Legierungsbestandteile in Metalllegierungen (18%), als Bestandteil von Schleifpulver (13%) sowie in Glas, Keramik und Leuchtmitteln eingesetzt (European Commission 2017a).

4.6 Kupfer

4.6.1 Bereitstellung

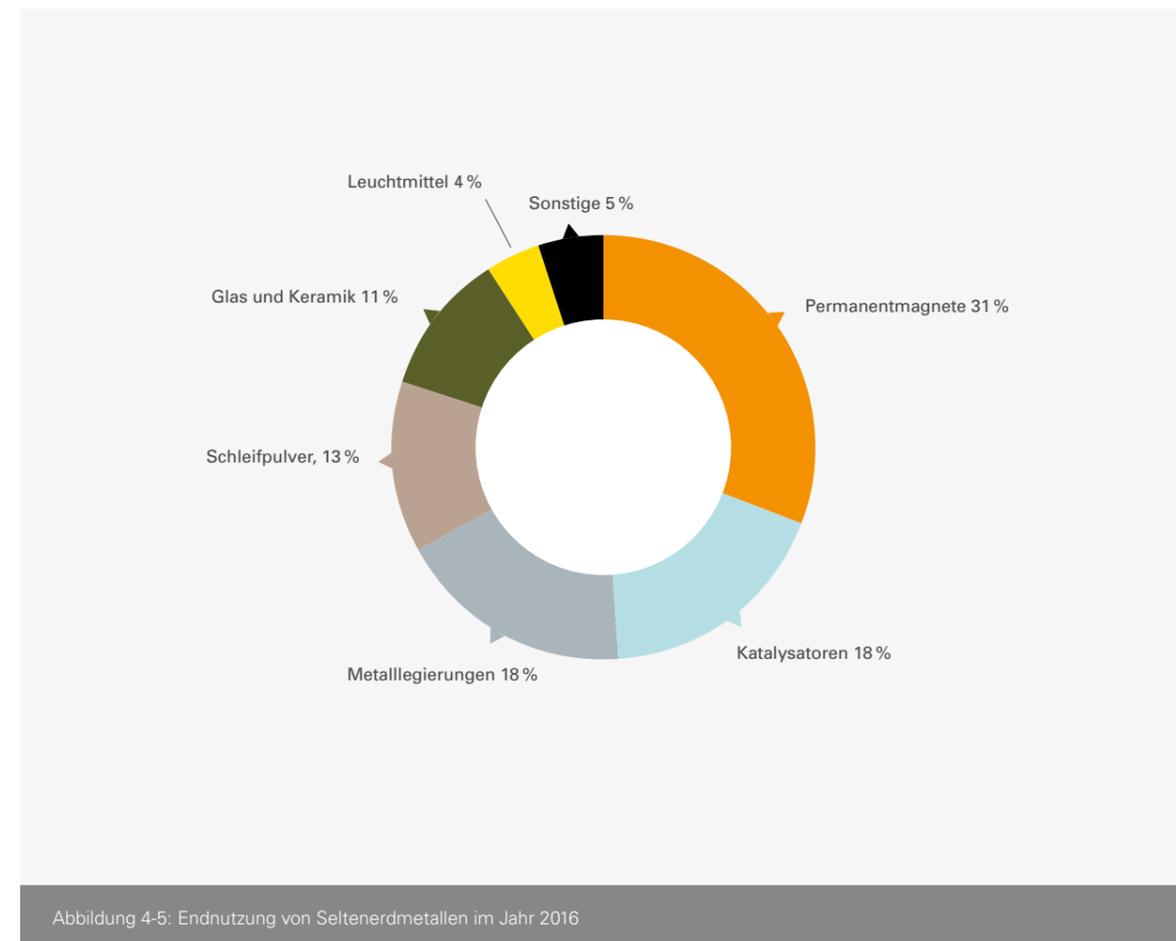
Kupfer kommt weltweit in unterschiedlichen geologischen Formationen vor. Es liegt entweder als gediegenes Metall (Reinform) oder in Form von Verbindungen vor. Zum heutigen Zeitpunkt stellen porphyrische Lagerstätten den Großteil der weltweiten Kupferproduktion (50–60 %) dar. Diese Lagerstätten haben im Mittel einen Kupfergehalt von 0,4 % (0,2 bis > 1,0%) und sind in Chile (größter Anteil an der weltweiten Förderung), Kanada und Südostasien sowie in Schweden, Griechenland und Bulgarien zu finden (European Commission 2017a; Marscheider-Weidemann et al. 2016). Kupfervorkommen in Sedimentgestein sind die weltweit zweitwichtigste Kupferquelle. Diese sind vor allem im sogenannten Kupfergürtel

in Zentralafrika zu finden und verfügen über einen Kupfergehalt von etwa 2 %. Des Weiteren ist Kupfer in vulkanischem Gestein (ca. 1 % Kupferanteil) z. B. in Spanien zu finden (European Commission 2017a). Grundsätzlich gibt es drei Techniken zur Förderung von Kupfer: Tagebau, Untertagebau und In-situ-Laugungsverfahren.¹⁰ Vorherrschend ist aktuell insbesondere der Tagebau, da hier auch Erze mit niedrigem Kupfergehalt wirtschaftlich gefördert werden können (European Commission 2017a). Nach der Förderung der kupferhaltigen Erze werden diese in Erzbrechern zerkleinert und zu Pulver verarbeitet. Durch nachfolgende Flotationsschritte wird der Kupfergehalt der Konzentrate im Mittel auf 20–30 % angehoben. Dieser Schritt findet meist direkt an der Mine statt. Die entstehenden Konzentrate werden dann zu entsprechenden Kupferaffinerien transportiert, wo sie mehrere pyrometallurgische Prozesse durchlaufen. Über einen Schmelzprozess wird Kupferstein (Cu-Gehalt 30–80 %) gewonnen, der zu Blisterkupfer konvertiert und über eine nachfolgende Feuerraffination zu Anodenkupfer mit einem Kupfergehalt von > 99 % aufbereitet wird. Geringste Verunreinigungen sorgen dafür, dass die thermische und elektrische Leitfähigkeit stark herabgesetzt ist, was das Metall für viele Anwendungen ungeeignet macht. Daher

wird in aller Regel eine elektrolytische Raffination nachgeschaltet, um den Kupfergehalt auf ca. 99,99 % anzuheben (Deutsches Kupferinstitut 2018).

Mit über 30 % fördert Chile, gefolgt von China und Peru, die größte Menge an Kupfer. Die Raffination der produzierten Kupferkonzentrate zu hochreinem Kupfer erfolgt jedoch nicht zwangsläufig im gleichen Land. Einige Länder stellen deutlich mehr raffiniertes Kupfer her, als durch die Minenförderung des eigenen Landes bereitgestellt werden kann. Dem Handel mit Kupferkonzentraten kommt daher eine große Bedeutung zu. So wird beispielsweise ein Großteil der Kupferkonzentrate von Südamerika nach China verschifft (ResourceTrade.earth 2016), wo 35 % der weltweiten Raffinadeproduktion stattfindet. Hierzu gehört neben der Raffination von Konzentraten (Primärproduktion)¹¹ von Kupfer. In einigen Ländern (z.B. Belgien und Deutschland) macht die Sekundärproduktion über 40 % der gesamten Kupferproduktion aus (DERA 2018).

Tabelle 4-7 fasst die wichtigsten Kupferförderländer (in Summe ca. 75 %) sowie deren Anteil an der globalen Förderung zusammen.



Land	Förderung 2015 (ROSYS)	Anteil an globaler Förderung
Chile	5.772.100 t	32 %
China	1.711.900 t	9 %
Peru	1.700.800 t	9 %
USA	1.439.000 t	8 %
Australien	995.900 t	5 %
DR Kongo	905.900 t	5 %
Sambia	719.200 t	4 %
Russische Föderation	699.800 t	4 %
Welt	19.261.000 t	100 %

Tabelle 4-7: Wichtigste Förderländer für Kupfer

¹⁰ | In-situ-Laugung wird beispielsweise bei der Urangewinnung verwendet. Dabei wird meist eine Lauge in das Gestein gepumpt, wodurch gezielt Gesteinselemente ausgelöst werden können. Das entstehende Fluid wird an die Oberfläche befördert und dort weiterverarbeitet (Wiener Umwelthanwaltschaft 2018).

¹¹ | Kupfer kann ohne Qualitätsverlust durch Recycling wiedergewonnen werden, weshalb der Sekundärproduktion eine besondere Rolle zukommt (Marscheider-Weidemann et al. 2016).

4.6.2 Verwendung

Kupfer ist aufgrund seines niedrigen elektrischen Widerstands und der guten Wärmeleitfähigkeit ein bedeutender Werkstoff für eine Vielzahl von technischen Anwendungen. Haushaltskomponenten sowie Stromkabel und Kupferleitungen, zum Beispiel zum Transport von Trinkwasser, stellen mit 22 % bzw. 21 % die beiden größten Anwendungsfelder dar (Abbildung 4-6). Für digitale Anwendungen werden aktuell etwa 14 % des weltweit genutzten Kupfers benötigt. Weitere 15 % des Kupfers werden in Maschinen jeglicher Art, u. a. in Form von Kupferlegierungen, verwendet. Das Legieren mit anderen Metallen ermöglicht eine weitere Optimierung der

Eigenschaften von Kupfer. Besonders Bronze und Messing sind historisch relevante Kupferlegierungen, die beispielsweise in der Schifffahrt als Propellerwerkstoff eingesetzt werden (Deutsches Kupferinstitut 2018).

4.7 Fazit

In diesem Kapitel wurden die Rohstoffe näher dargestellt, die in Kapitel 3 für die Anwendung in Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen als kritisch identifiziert wurden. Hierbei wurde insbesondere auf die verschiedenen geologischen Ursprünge und damit zusammenhängenden Gewinnungsverfahren sowie die Länder, die für die globale Rohstoffbereit-

stellung relevant sind, eingegangen. Dabei zeigt sich, dass die Bereitstellung von Lithium, Kobalt, Seltenerdmetallen und Platin auf sehr wenige Förderländer verteilt ist.

Des Weiteren wurde auf die globale Verwendung der Rohstoffe eingegangen. Hier zeigt sich, dass Lithium, Kobalt und Seltenerdmetalle zu großen Teilen in Batterien bzw. in Permanentmagneten eingesetzt werden. Die Verwendung der Rohstoffe Nickel, Platin und Kupfer wird jedoch von anderen Verwendungsarten dominiert, so dass die Nutzung in Batterien, Brennstoffzellen bzw. im Fahrzeug eher eine Nebenanwendung darstellt.

In diesem Kapitel wurde die Bereitstellung und die Verwendung der als kritisch identifizierten Rohstoffe unabhängig von der tatsächlich verwendeten Menge in Fahrzeugen dargestellt. Betrachtungen auf Fahrzeugebene finden in Kapitel 10 statt.

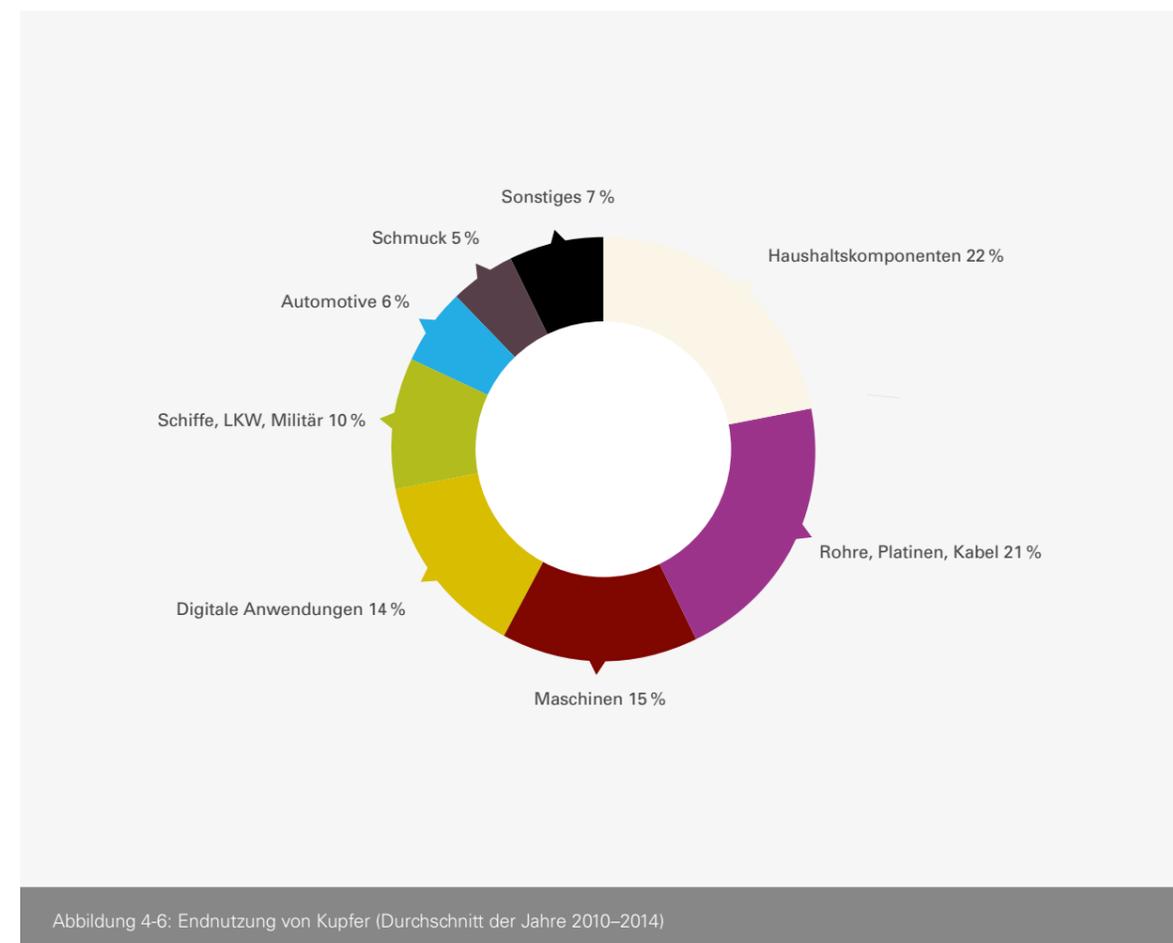


Abbildung 4-6: Endnutzung von Kupfer (Durchschnitt der Jahre 2010–2014)





05

**Weltweite Entwicklung von
Abbau und Reserven**

05

Weltweite Entwicklung von
Abbau und Reserven

Der Einsatz von Metallen in verschiedenen Produkten und Technologien stellt eine Nutzung von nichterneuerbaren Rohstoffen dar, zu der sich stets Fragen nach der aktuellen und zukünftigen Verfügbarkeit und ggfs. auftretenden Verknappungseffekten stellen. Zwar können insbesondere Metalle sehr gut durch Recycling wiedergewonnen werden, jedoch treten je nach Anwendung oder auch bei der Rückgewinnung gewisse Materialverluste auf. Des Weiteren besteht selbst bei einem perfekt geschlossenen Wiedergewinnungskreislauf ohne Materialverluste Bedarf nach neuem Primärmaterial, nämlich um die steigende Nachfrage zu bedienen.

Um die Versorgungssituation der für die Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge als kritisch identifizierten Rohstoffe zu bewerten, werden in diesem Kapitel die Reserven und der Abbau der Rohstoffe in ihrer zeitlichen Entwicklung detailliert beleuchtet. Vorab werden hierfür in Abschnitt 5.1

einige Konzepte und Begriffe eingeführt, die in der entsprechenden Diskussion äußerst wichtig sind.

5.1 Einführung grundlegender Begriffe und Konzepte

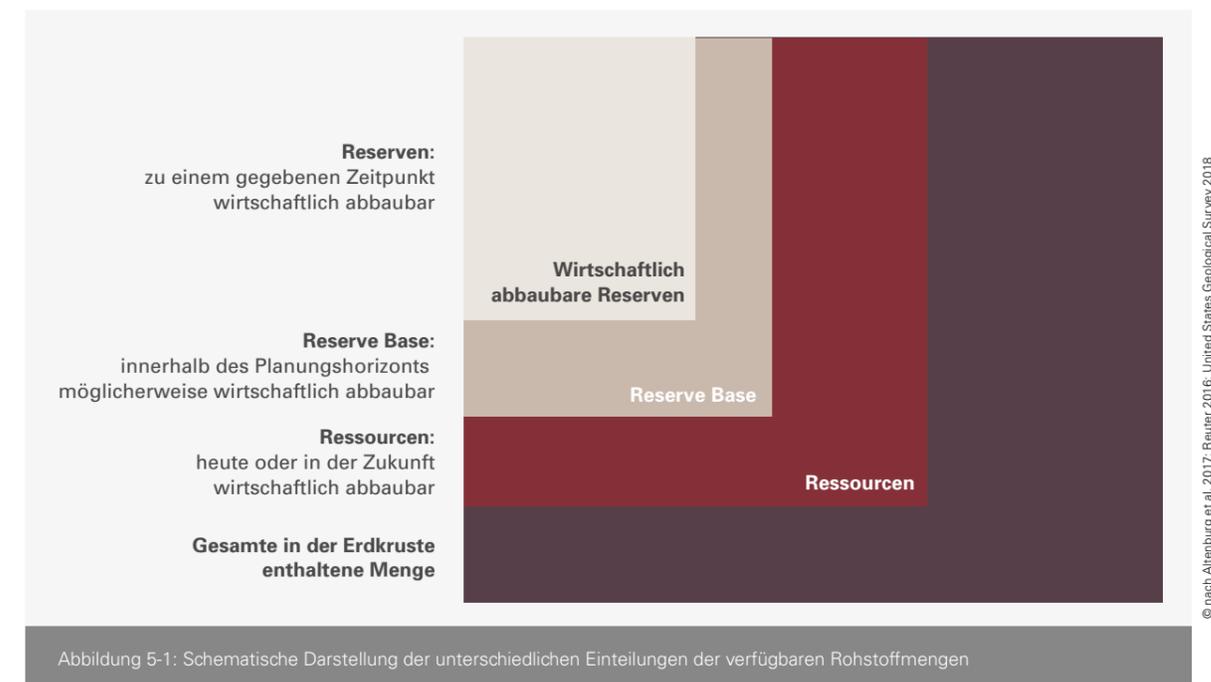
Während die jährliche Abbaumenge eines Rohstoffs sehr klar definiert werden kann, bestehen sehr unterschiedliche Konzepte zur Quantifizierung der verfügbaren Menge eines Rohstoffs. Diese wird beeinflusst von bestimmten Eigenschaften der Lagerstätten, z. B. der gegebenen Erz- und Metallkonzentrationen, der Tiefe und dem Aufwand zum Abbau der Rohstoffe, aber auch externe Faktoren, wie gesetzliche Regelungen, lokale Arbeitskosten oder einsetzbare Abbau- und Aufbereitungstechnologien, bestimmen die Wirtschaftlichkeit der Förderung. Ein weiterer wichtiger Indikator ist die Kenntnis über den Inhalt von Lagerstätten. Je nach bereits erfolgter Exploration und Gewissheit über die in einer Lagerstätte abbaubaren

Mengen ergibt sich höhere oder niedrigere Sicherheit der verfügbaren Menge.

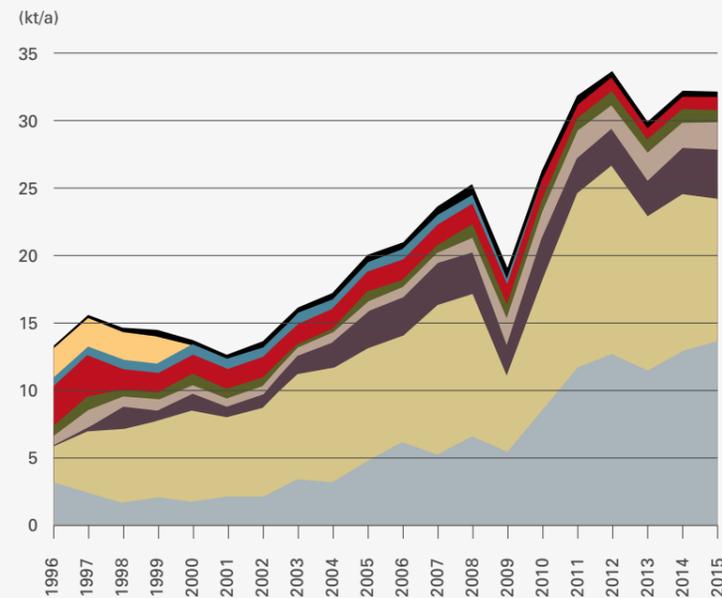
Vereinfacht werden die Begriffe unterschieden, die in Abbildung 5-1 dargestellt sind. Aus der Konzentration eines Elements in der Erdkruste wird die Gesamtheit eines Rohstoffs in dieser berechnet. Jedoch kann man diese Menge nicht als verfügbar ansehen, weil dazu ein Element selbst aus Lagerstätten abgebaut werden müsste, in denen dieses in geringsten Konzentrationen vorhanden ist. Stattdessen werden unter dem Begriff der Reserven diejenigen Lagerstätten zusammengefasst, aus denen Rohstoffe aktuell wirtschaftlich abbaubar sind. Dieser Begriff wird häufig von der US-amerikanischen geologischen Behörde, dem United States Geological Survey (kurz: USGS), verwendet und ist synonym zu dem von der DERA verwendeten Begriff der Vorräte definiert. Allerdings ist diese Menge durch den Bezug zur Wirtschaftlichkeit des Abbaus auch zeitlich relativ variabel: So können beispielsweise Kostensteigerungen den Abbau von zuvor wirtschaftlichen Lagerstätten unwirtschaftlich machen. Ebenso kann ein steigender Rohstoffpreis auf dem Weltmarkt den Abbau von bislang unrentablen Lagerstätten wirtschaftlicher machen. Somit wird die Menge der ausgewiesenen Reserven trotz fortschreitendem Rohstoffabbau häufig nicht geringer. Bis vor ein paar Jahren hat das USGS auch die Menge der sogenannten

Reserve Base ausgewiesen, was der Rohstoffmenge entsprach, die gewisse chemisch-physikalische Mindestbedingungen erfüllte, um mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit innerhalb des Planungshorizonts wirtschaftlich zu werden. Die darüber hinausgehende Mengenangabe der Ressourcen beinhaltet Lagerstätten mit Konzentrationen eines Rohstoffs, deren Extraktion heute oder in Zukunft möglicherweise wirtschaftlich sein wird.

Der Quotient aus verfügbarer Menge und jährlicher Abbaurate wird statische Reichweite genannt und zeigt die theoretische Dauer an, wie lange der aktuelle Abbau bei gegebener (fester) verfügbarer Menge betrieben werden kann. In der Regel wird die statische Reichweite auf Basis der Reserven berechnet. Angesichts der möglichen dynamischen Veränderungen beider Größen, der Abbauraten und der wirtschaftlich abbaubaren Reserven, darf diese Größe jedoch nicht als prognostizierter Zeitpunkt angesehen werden, wann ein Rohstoff nicht mehr verfügbar sein wird. Stattdessen dient die Größe für Vergleiche zwischen den Abbaupraktiken verschiedener Länder angesichts der dort vorhandenen Vorräte oder auch als Indikator der Notwendigkeit und Dringlichkeit, um neue wirtschaftlich abbaubare Lagerstätten durch Exploration, technischen Fortschritt oder ähnliche Aktivitäten zu erschließen.



Jährliche Minenförderung Lithium 1996–2015



Lithiumreserven 1995–2015

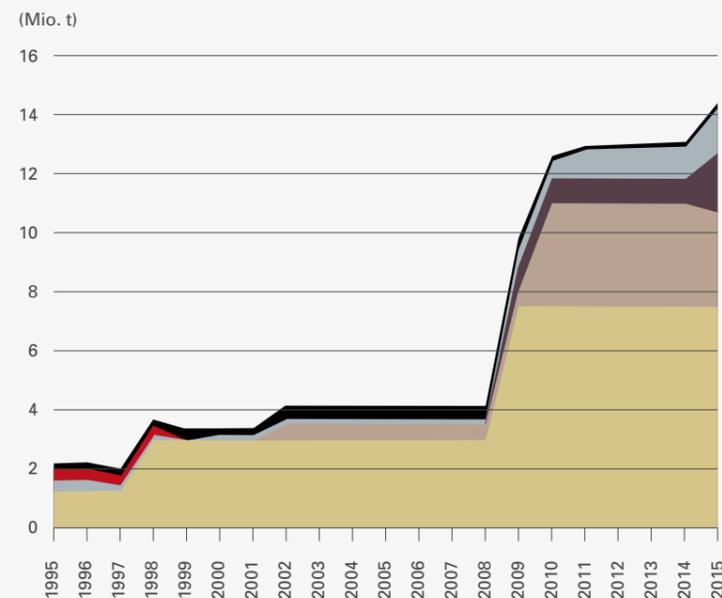


Abbildung 5-2: Gegenüberstellung der Entwicklung von Förderung (oben) und wirtschaftlich abbaubaren Reserven (unten) von Lithium nach ROSYS

© DERA 2018

5.2 Lithium

Wie in Abbildung 5-2 zu sehen ist, betrug die Primärförderung im Jahr 2015 mit mehr als 30.000 t/a mehr als doppelt so viel wie noch im Jahr 1995. Den heute wichtigsten Förderländern, Australien und Chile, kam auch im Verlauf der letzten 20 Jahre eine wichtige Rolle bei der Lithiumbereitstellung zu. Besonders markant ist der mit der Weltwirtschaftskrise zusammenfallende Einbruch in der Lithiumförderung, der sich insbesondere auf die Förderung in Chile auswirkte. Im Zusammenhang mit diesem Einbruch ist es interessant zu erwähnen, dass der Großteil des Lithiumbedarfs zu diesem Zeitpunkt (wie auch heute) nicht für die Batterieproduktion, sondern für andere Anwendungen verwendet wird (Abschnitt 4.1.2). Außerdem ist Chile der wichtigste Anbieter von Lithium für den europäischen Markt (European Commission 2017a), der sehr stark von der Weltwirtschaftskrise betroffen war.

Hinsichtlich der wirtschaftlich abbaubaren Reserven ist der erhebliche Anstieg im Zeitraum von 2008 bis 2010 zu erwähnen, in dem sich die ausgewiesenen Reserven ungefähr verdreifacht haben. Die Erhöhung der Reserven folgt auf das Erreichen des Hochs im Lithiumpreis (Abschnitt 6.1.1). Insbesondere waren von der Ausweitung der Reserven die Vorräte in Chile und China betroffen. Da China aktuell nur eine relativ geringe Menge an Lithium abbaut, ergibt sich hieraus eine sehr hohe statische Reichweite (von mehr als 1.000 Jahren). Auch die statische Reichweite der Lithiumreserven in Chile

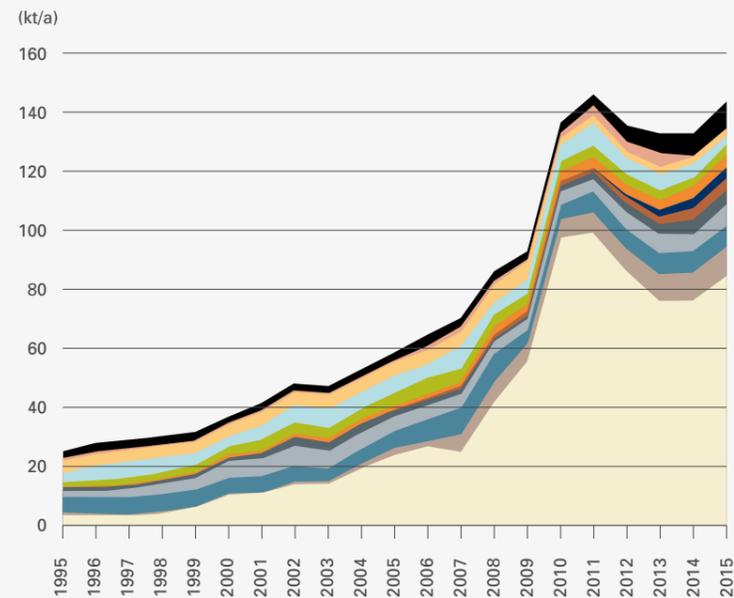
und Argentinien ist relativ hoch, wohingegen der Wert mit ca. 100 Jahren für Australien relativ gering ist und somit unter dem globalen Wert der statischen Reichweite von rund 450 Jahren liegt.

Die weltweiten Lithiumressourcen werden von der USGS mit mehr als 53 Mio. t angegeben (United States Geological Survey 2018), woraus sich eine statische Reichweite von über 3.500 Jahren ergibt. Hierbei sind die Länder mit den größten angegebenen Lithiumressourcen Argentinien (9,8 Mio. t), Bolivien (9 Mio. t) und Chile (8,4 Mio. t). Darunter ist besonders Bolivien hervorzuheben, da es noch kein kommerzieller Lithiumproduzent ist (Schmidt 2017) und zu dessen Reserven i. d. R. keine Angaben gemacht werden. Der Abbau von Lithium aus dem Salar de Uyuni gestaltet sich aufgrund zahlreicher Aspekte, wie beispielsweise der Anteile von Lithium und Magnesium sowie Sulfat, des lokalen Tourismus und des Umweltschutzes sowie des allgemeinen Investitionsklimas, als schwierig (Schmidt 2017). Dennoch wurde Ende 2018 ein Joint Venture zwischen dem bolivianischen Staatsunternehmen YLB und dem deutschen Unternehmen ACISA geschlossen, das die Lithiumgewinnung aus dem Salar de Uyuni mit einem eigens dafür entwickelten Verfahren zum Ziel hat (ACI Systems Alemania GmbH 2018).



© Matyas Rehak/shutterstock

Jährliche Minenförderung Kobalt 1995–2015



- Sonstige
- Indonesien
- Russische Föderation
- Sambia
- Kuba
- Brasilien
- Madagaskar
- Philippinen
- Neukaledonien
- Australien
- Kanada
- China
- DR Kongo

Kobaltreserven 1995–2015

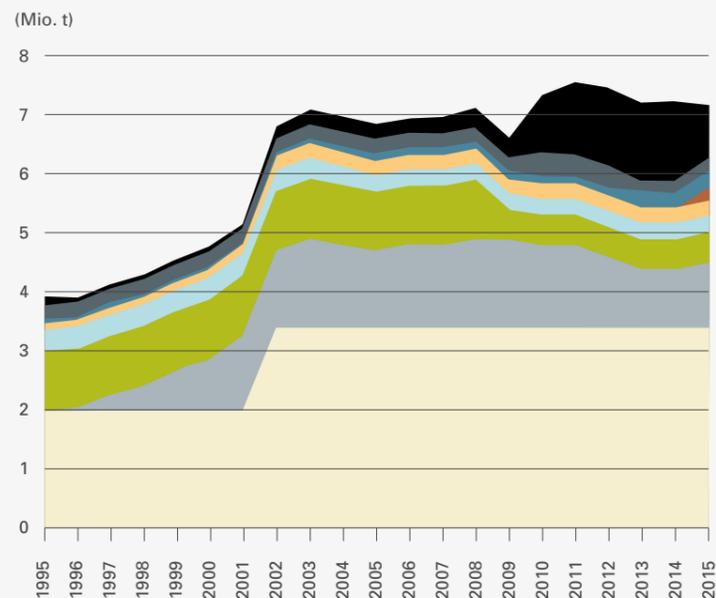


Abbildung 5-3:
Gegenüberstellung der Entwicklung von Förderung (oben) und wirtschaftlich abbaubaren Reserven (unten) für Kobalt nach ROSYS

© DERA 2018

5.3 Kobalt

Die Förderung von Kobalt wurde im Zeitraum von 1995 bis 2015 deutlich, und zwar auf ungefähr das Sechsfache, gesteigert. Während der Anteil der DR Kongo an der weltweiten Förderung im Jahr 2000 noch weniger als 30% und im Jahr 2005 ca. 40% betrug, wurde dieser bis zum Jahr 2010 auf gut 70% gesteigert. Zwar kam es in der Zeit ab dem Jahr 2011 zu einem Rückgang der absoluten Kobaltförderung in der DR Kongo, aber dennoch verzeichnete das Land im Jahr 2015 einen Anteil von knapp 60% der weltweit geförderten Kobaltmenge.

Auch hinsichtlich der Reserven kommt der DR Kongo mit mehr als 3 Mio. t und somit knapp der Hälfte der weltweiten Kobaltreserven eine Schlüsselrolle zu. Diese wurden zum Jahr 2002 aufgrund neuer Informationen aus der DR Kongo stark nach oben korrigiert (United States Geological Survey

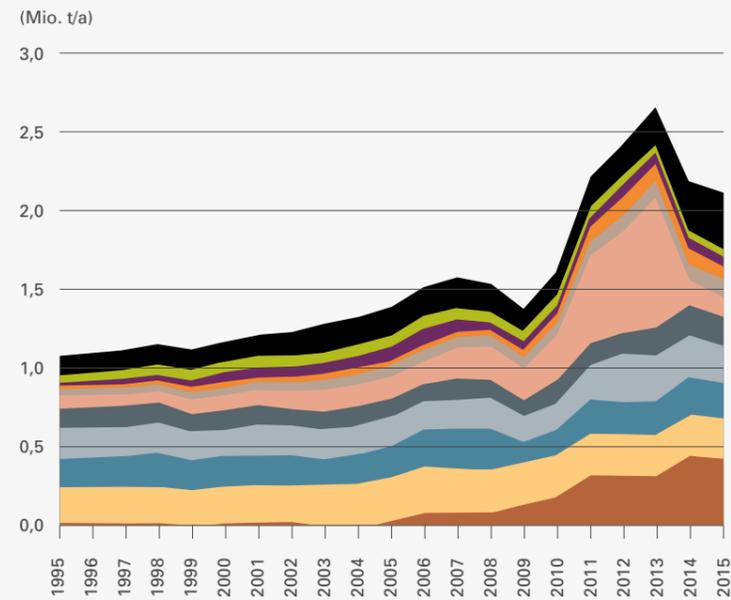
2003). Bemerkenswert ist, dass sich trotz der umfangreichen Reserven aufgrund der hohen aktuellen Abbauraten in der DR Kongo eine relativ geringe statische Reichweite von ca. 40 Jahren ergibt; für China und Kanada ist sie sogar noch geringer. Für Australien und Russland hingegen, deren jährliche Abbaumenge deutlich niedriger ist, liegt die statische Reichweite mit über 100 Jahren deutlich über dem globalen Wert der statischen Reichweite von rund 50 Jahren.

Die identifizierten landgebundenen Ressourcen werden von der USGS auf ungefähr 25 Mio. t beziffert und entsprechen somit in etwa dem Dreifachen der aktuellen Reserven, woraus sich eine statische Reichweite der Ressourcen von ca. 170 Jahren ergibt. Darüber hinaus wurden Ressourcen in deutlich größeren Mengen auf dem Meeresboden identifiziert (United States Geological Survey 2018).



© farbled/shutterstock

Jährliche Minenförderung Nickel 1995–2015



- Sonstige
- Kuba
- Kolumbien
- Brasilien
- China
- Indonesien
- Neukaledonien
- Australien
- Kanada
- Russische Föderation
- Philippinen
- Südafrika

Nickelreserven 1995–2015

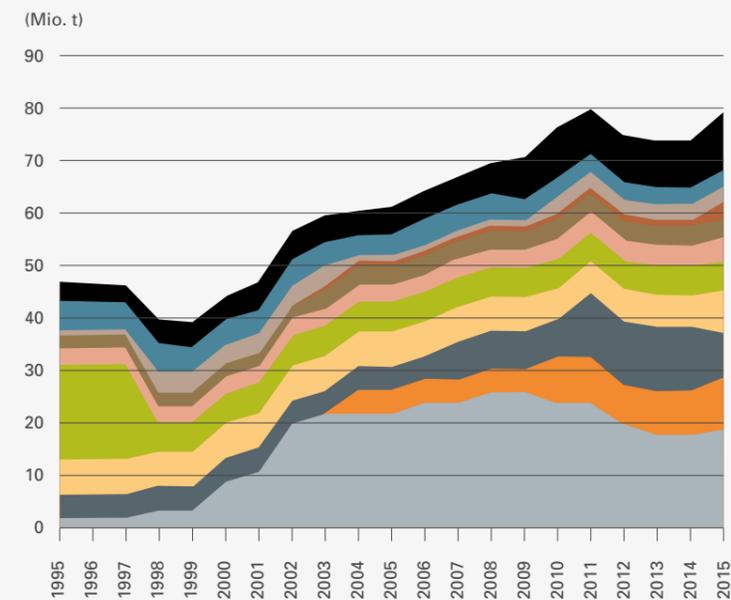


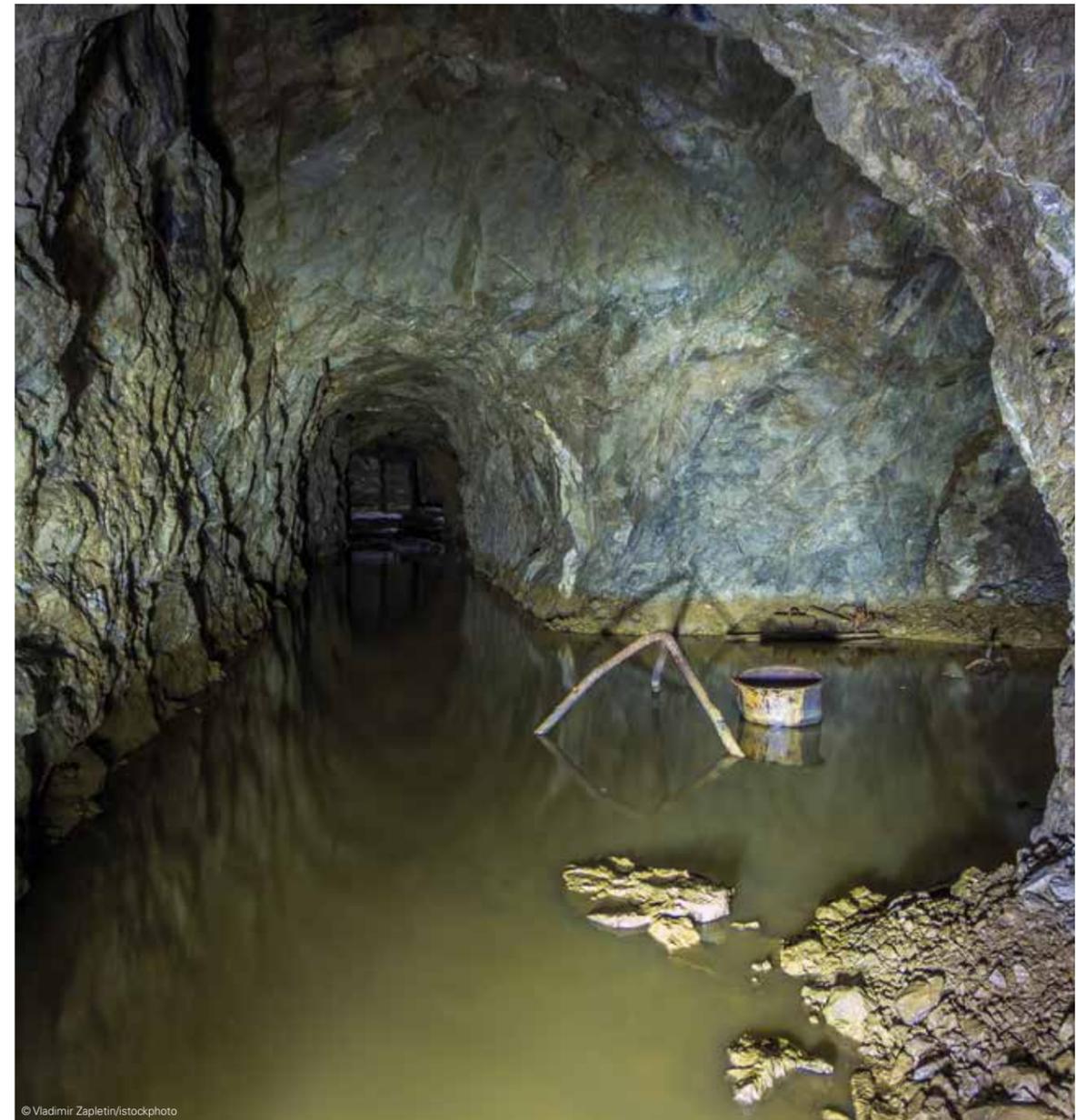
Abbildung 5-4:
Gegenüberstellung der Entwicklung von Förderung (oben) und wirtschaftlich abbaubaren Reserven (unten) für Nickel nach ROSYS

© DERA 2018

5.4 Nickel

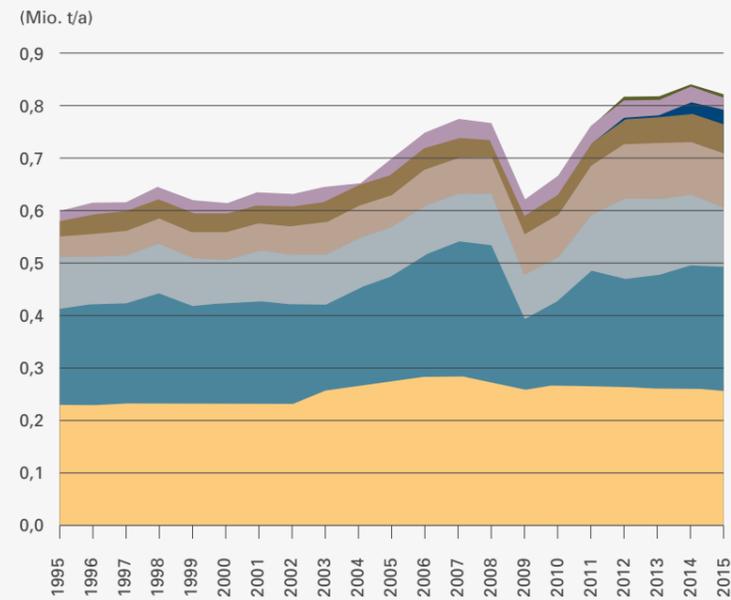
Wie Abbildung 5-4 zu entnehmen ist, sind die Philippinen – das Land mit der heute größten Nickelförderung – erst seit 2006 in nennenswertem Maße in diesem Bereich aktiv. Gleichzeitig fällt auf, dass die Aktivitäten in Indonesien im

Jahr 2014 deutlich geringer waren als im Jahr zuvor. Die beiden Beispiele zeigen, wie variabel die Entwicklungen in diesem Sektor sein können, unabhängig von der Frage der vor Ort existierenden Reserven.



© Vladimir Zapletin/istockphoto

Jährliche Minenförderung Nickel (Sulfide) 1995–2015



- Simbabwe
- Botswana
- Myanmar
- Südafrika
- China
- Australien
- Kanada
- Russische Föderation

Nickelreserven (Sulfide) 1995–2015

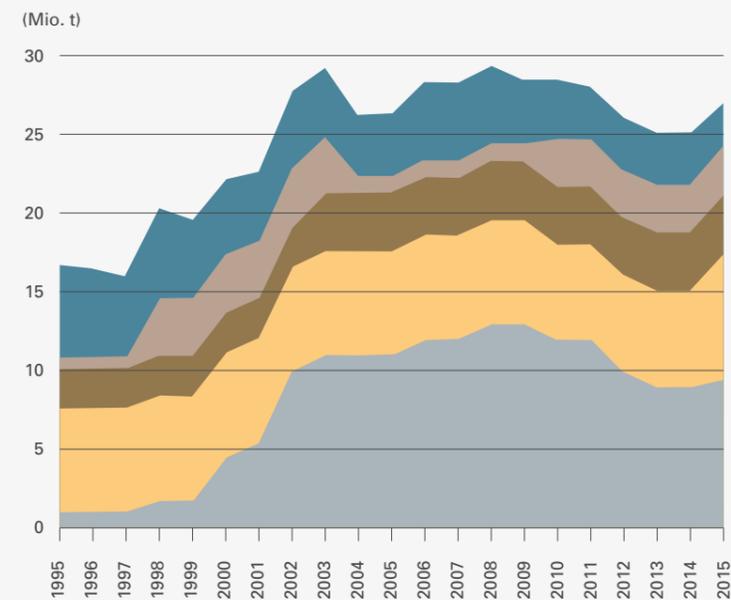


Abbildung 5-5: Gegenüberstellung der Entwicklung von Förderung (oben) und wirtschaftlich abbaubaren Reserven (unten) für Nickel aus sulfidischen Erzen nach ROSYS

© DERA 2018

In Abbildung 5-5 werden Abbaumenge und Reserven der Länder dargestellt, die für die Nickelbereitstellung aus sulfidischen Erzen relevant sind, die i. d. R. für die Produktion von Class-I-Nickel verwendet werden (Abschnitt 4.3.1). Die Förderung ist im Jahr der Weltwirtschaftskrise – 2009 – deutlich zurückgegangen, was sich insbesondere an den in Kanada geförderten Mengen zeigt.

Dieser Rückgang ist in der Zwischenzeit wieder ausgeglichen, so dass die globale Nickelförderung aus sulfidischen Erzen nun sogar das Vorkrisenniveau übersteigt.

Beim Betrachten der wirtschaftlich abbaubaren Reserven fällt der deutliche Anstieg auf, den die australischen Reserven im Zeitraum von 1997 bis 2003 verzeichneten und der diese auf

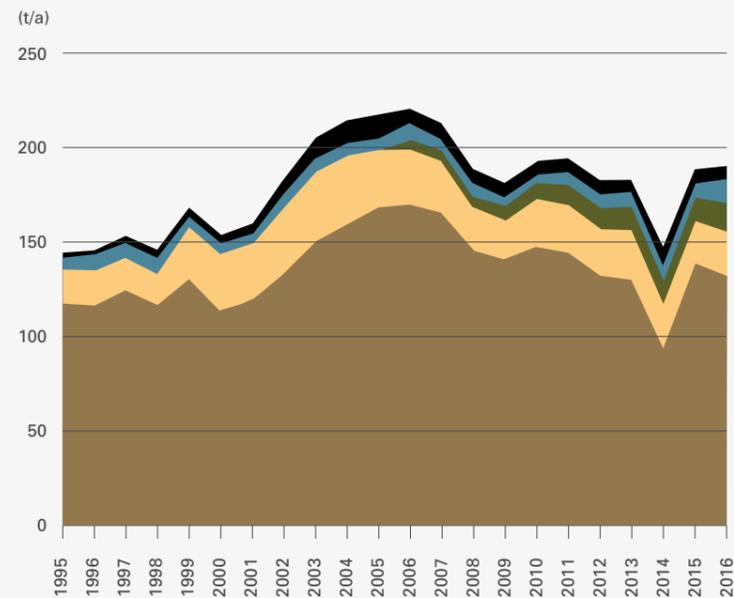
das Zehnfache anhub. Entsprechend ist auch die statische Reichweite der australischen Reserven mit ca. 80 Jahren deutlich höher als die der anderen wichtigen Förderländer, wie Russland (30 Jahre), Kanada (<15 Jahre) und China (30 Jahre). Die globale statische Reichweite von Nickel aus sulfidischen Erzen beträgt knapp 33 Jahre und ist somit etwas geringer als die statische Reichweite der allgemeinen Nickelreserven mit 37 Jahren.

Von den weltweiten landgebundenen Nickelressourcen, die von der USGS auf mehr als 130 Mio. t beziffert werden, befinden sich ca. 40 % in sulfidischen Lagerstätten und belaufen sich somit auf gut 50 Mio. t, woraus sich eine statische Reichweite von mehr als 60 Jahren ergibt (Government Publishing Office 2018).

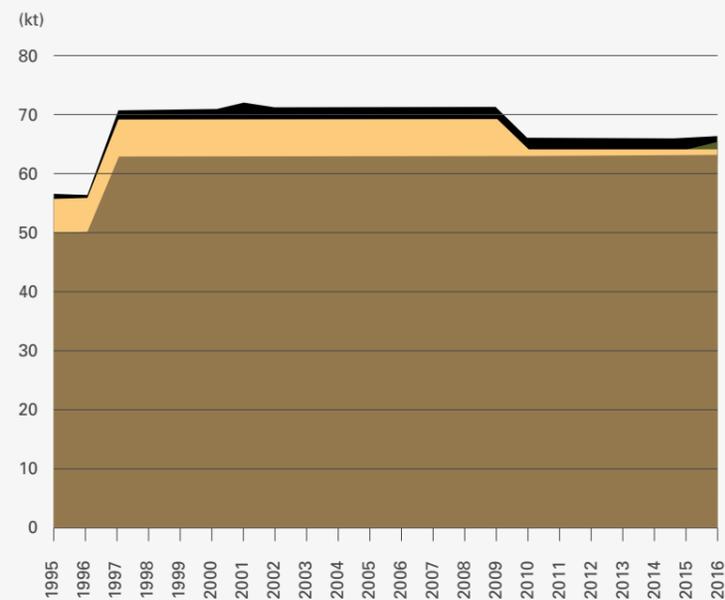


© Bjoern Wylezich/shutterstock

Jährliche Minenförderung Platin 1995–2016



PGM-Reserven 1995–2016



- Sonstige
- Kanada
- Simbabwe
- Russische Föderation
- Südafrika

Abbildung 5-6: Gegenüberstellung der Entwicklung von Förderung (oben) und wirtschaftlich abbaubaren Reserven (unten) für PGM nach USGS

© USGS 2018b

5.5 Platin

Die herausragende Rolle Südafrikas bei der Förderung von Platin und für die wirtschaftlich abbaubaren Reserven von Platingruppenmetallen wird in Abbildung 5-6 deutlich. Während ca. 70 % des weltweit geförderten Platins im Jahr 2016 aus Südafrika stammten, verzeichnete das Land über 90 % der weltweiten wirtschaftlich abbaubaren PGM-Reserven. Im Jahr 2014 kam es zu einem merklichen Einbruch der Platinförderung in Südafrika, was an dem fünf Monate andauernden Streik der südafrikanischen Minenarbeiter lag (United States Geological Survey 2015, 2016).

Anders als für die Förderung finden sich in der Regel keine Angaben zu den Reserven der einzelnen PGM, sondern diese werden häufig nur als Gruppe erfasst. Zur Abschätzung des Platinanteils an den PGM-Reserven wurde daher die bereits in Abschnitt 3.3.2 beschriebene Betrachtung verwendet. Die in Abbildung 5-6 dargestellte Korrektur der russischen Reserven

(Reduktion) im Jahr 2010 basierte auf russischen Literaturangaben (United States Geological Survey 2011).

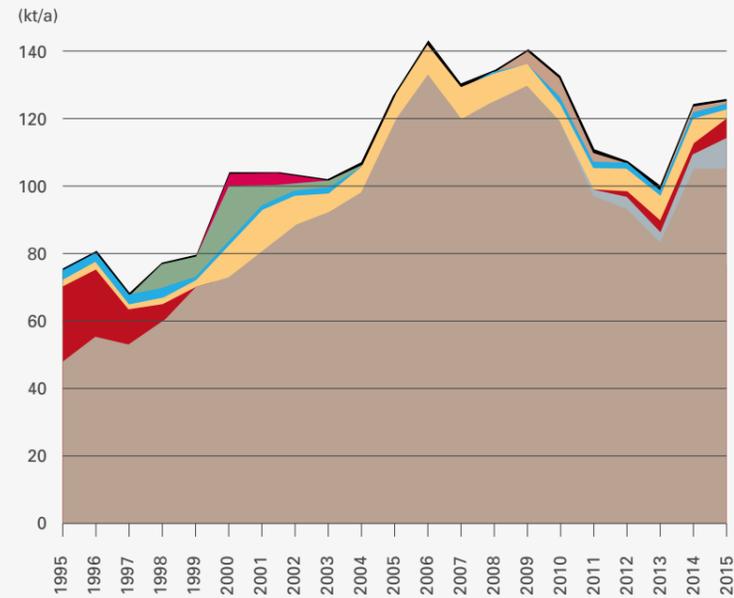
Die daraus errechnete aktuelle statische Reichweite der weltweiten Platinvorräte liegt bei ca. 200 Jahren, wobei die statische Reichweite für Südafrika noch höher liegt (Schmidt 2015, United States Geological Survey 2018). Hierbei gilt es auch zu bedenken, dass das Verhältnis von Platin zu Palladium in Südafrika in der Regel bei $Pt/Pd \geq 1$ liegt und in vielen anderen Lagerstätten, wie beispielsweise im Stillwater-Komplex in den USA, im russischen Norilsk-Talnakh-Distrikt und im Sudbury-Komplex in Kanada, hingegen Palladium dominiert (Schmidt 2015).

Die weltweiten PGM-Ressourcen werden von der USGS auf mehr als 100kt beziffert (United States Geological Survey 2018).



© Oat_Phawat/stockphoto

Jährliche Minenförderung Seltenerdoxide 1995–2015



Seltenerdoxidreserven 1995–2015

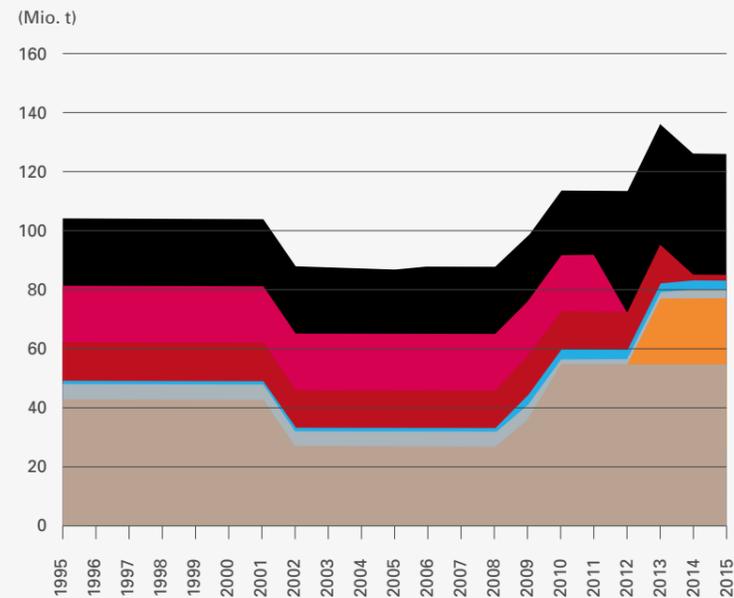


Abbildung 5-7: Gegenüberstellung der Entwicklung von Förderung (oben) und wirtschaftlich abbaubaren Reserven (unten) für SEO nach ROSYS

© DERA 2018

5.6 Seltenerdmetalle

Die jährliche Förderung der SEO (Abbildung 5-7) ist im Zeitraum von 1995 bis 2006 auf fast das Doppelte angestiegen. Dann kam es zunächst zu einer Stagnation der jährlichen Fördermenge und ab dem Jahr 2010 zu einem Rückgang, der 2013 ein Minimum zeigte und insbesondere von der Förderung in China ausging. In diesem Zeitraum drosselte China nämlich seine Exporte von Seltenerdmetallen, was auch zu entsprechend hohen Weltmarktpreisen führte (Abschnitt 6.5.1). Die Exportrestriktionen wurden nach einem Schiedspruch der Welthandelsorganisation im Jahr 2015 jedoch wieder aufgehoben (Zeit Online 2015).

Des Weiteren zeigen sich zeitweise Aktivitäten einiger Länder in der Förderung von Seltenerdmetallen: So endete die nennenswerte Förderung in den USA beispielsweise im Jahr 1999 und wurde im Jahr 2012 wieder aufgenommen. Auch für die Länder Kirgisistan, Indien und Thailand sind geringere Aktivitäten zur Förderung von Seltenerdmetallen dargestellt, die zwischenzeitlich komplett oder fast gänzlich zum Erliegen kam.

Während die chinesischen SEO-Reserven im Jahr 2002 aufgrund neuer Informationen aus China nach unten korrigiert

wurden (United States Geological Survey 2003), kam es in den Jahren 2009 und 2010 im Zuge von Datenaktualisierungen zu einer Erhöhung ebendieser, sogar über den ursprünglichen Wert hinaus (United States Geological Survey 2010, 2011). Die zweitgrößten Reserven werden seit 2013 für Brasilien angegeben, einem bislang weniger aktiven Land bei der SEO-Förderung (in der in Abbildung 5-7 dargestellten Förderung unter Sonstige enthalten). Die Reserven Australiens, Indiens und der USA werden als verhältnismäßig gering eingeschätzt.

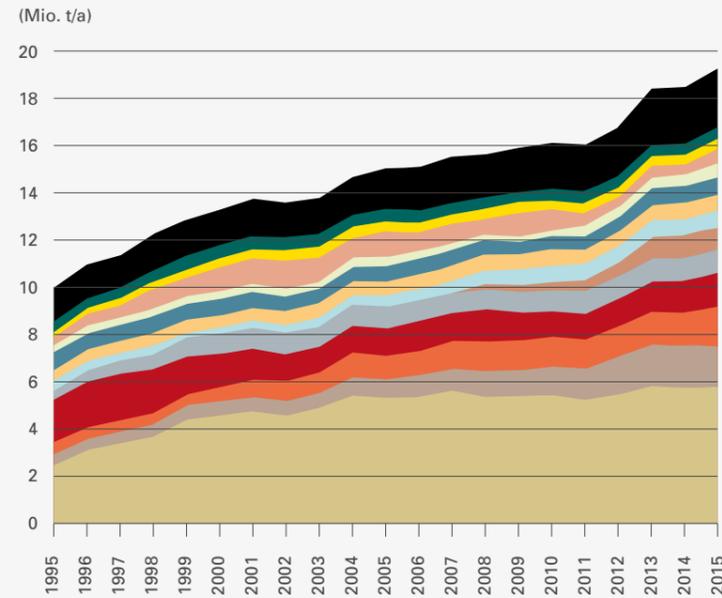
Daraus ergibt sich eine globale statische Reichweite der SEO-Reserven von mehr als 1.000 Jahren und mehr als 500 Jahren für China. Die statische Reichweite der Reserven in Australien und den USA liegt mit ca. 300 Jahren etwas darunter, die für Indien jedoch deutlich darüber (DERA 2018).

Zu den Ressourcen der Seltenerdmetalle veröffentlicht das USGS in seinen Mineral Commodity Summaries keine quantitativen Angaben (United States Geological Survey 2018).

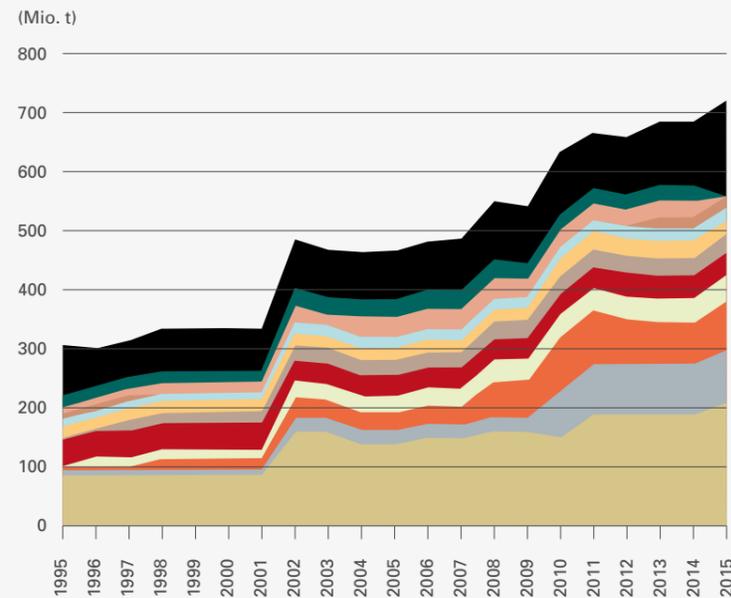


© Bjoern Wylezich/shutterstock

Jährliche Minenförderung Kupfer 1995–2015



Kupferreserven 1995–2015



- Sonstige
- Polen
- Kasachstan
- Indonesien
- Mexiko
- Kanada
- Russische Föderation
- Sambia
- DR Kongo
- Australien
- USA
- Peru
- China
- Chile

Abbildung 5-8: Gegenüberstellung der Entwicklung von Förderung (oben) und wirtschaftlich abbaubaren Reserven (unten) für Kupfer nach ROSYS

© DERA 2018

5.7 Kupfer

Wie in Abbildung 5-8 dargestellt, wuchs die Förderung von Kupfer von ca. 10 Mio. t im Jahr 1995 auf nahezu das Doppelte im Jahr 2015. Daran sind zahlreiche Länder beteiligt, wobei von Chile mit einem Beitrag von ca. 30 % im Jahr 2015 der größte Anteil ausging.

Dies korreliert mit der Betrachtung der Reserven, von denen aktuell knapp 30 % in Chile liegen, gefolgt von Australien (12 %) und Peru (11 %). Zwischen den Jahren 1995 und 2015 stieg die Menge der bekannten Reserven auf mehr als das Doppelte.

Die sich ergebende statische Reichweite beträgt für die globalen Reserven knapp 40 Jahre, wobei manche Länder, wie China mit 17 Jahren oder die USA mit 23 Jahren, deutlich darunter- und andere Länder, wie Peru mit 48 Jahren und Australien mit 88 Jahren, darüberliegen.

Die USGS gibt die identifizierten Kupferressourcen mit 2,1 Mrd. t und die geschätzten unentdeckten Ressourcen mit 3,5 Mrd. t an, woraus sich statische Reichweiten von mehr als 100 bzw. weiteren 185 Jahren errechnen (Government Publishing Office 2018).



© YellLusZam1802/istock

5.8 Fazit

In diesem Kapitel wurden die Entwicklung der Förderung, die ausgewiesenen Mengen an wirtschaftlich abbaubaren Reserven sowie die sich daraus ergebenden statischen Reichweiten für die wichtigsten Förderländer der als kritisch identifizierten Rohstoffe für Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge dargestellt. Es wurde gezeigt, dass die Förderung all dieser Rohstoffe im Zeitraum von 1995 bis 2015 teils deutliche Steigerungen erfahren hat (insb. bei Kobalt). Nur an der Minenförderung von Nickel und Kupfer sind viele Länder in ähnlichem Maße beteiligt. Bei Lithium, Kobalt, Platin und Seltenerdelementen dominieren einzelne oder wenige Länder die Produktion. Das Risiko, das mit einer solchen Versorgungsstruktur einhergeht, ist anhand des Produktionsrückgangs bei den Seltenerdelementen im Zeitraum von 2011 bis 2013 und bei Platin im Jahr 2014 erkennbar. Gründe für solche Rückgänge können dabei sowohl gesteuerte politische Maßnahmen als auch externe und unvorhersehbare Ursachen wie ein Arbeiterstreik sein.

Trotz der umfassenden Förderaktivitäten und deren Ausweitung hat die Menge der wirtschaftlich abbaubaren Reserven aller sechs Rohstoffe zugenommen. Dies betrifft insbesondere die Lithiumreserven, die einen Zuwachs um den Faktor sechs verzeichneten, aber auch die Reserven von Kobalt, Nickel und Kupfer verdoppelten sich in etwa während des Betrachtungszeitraums.

Hinsichtlich der statischen Reichweite der Reserven ist interessant, dass dieser Indikator für Kobalt, für Nickel und für Kupfer die geringsten Werte annimmt (50 Jahre und weniger), wohingegen für Lithium, PGM und Seltenerdmetalle Werte über 100 Jahre (sogar über 1.000 bei SEE) errechnet werden.

In diesem Kapitel wurde die weltweite Entwicklung von Abbau und Reserven der als kritisch identifizierten Rohstoffe unabhängig von der tatsächlich verwendeten Menge in Fahrzeugen dargestellt. Betrachtungen auf Fahrzeugebene finden in Kapitel 10 statt.



06

Preise und Kosten

06

Preise und Kosten



In diesem Kapitel werden verschiedene wirtschaftliche Aspekte in Verbindung mit den einzelnen Rohstoffen thematisiert. Dabei wird auf die Preisentwicklung seit 1995 ebenso eingegangen wie auf die Preisentwicklung in der jüngeren Vergangenheit. Des Weiteren wird ein Blick auf die Kostenzusammensetzung zur Förderung der einzelnen Rohstoffe geworfen und ein Ausblick auf die zukünftigen Veränderungen von Angebot und Nachfrage unternommen, die zu Preisveränderungen führen könnten.

6.1 Lithium

6.1.1 Historische Preisentwicklung

Die Entwicklung des Lithiumcarbonatpreises ist in Abbildung 6-1 zu sehen. Sie ist gekennzeichnet durch eine starke Preisreduktion vom Jahr 2000 auf das Jahr 2001 und einen späteren Anstieg von 2005 bis 2008. Der steile Preisabfall von rund 4.500 \$/t auf 1.500 \$/t – was eine Absenkung um zwei Drittel bedeutet – ist laut Aussage einer wissenschaftlichen Publikation über die Lithiumindustrie durch den Markteintritt des chilenischen Chemiekonzerns SQM begründet (Ebensperger et al. 2005). Da SQM Lithiumchlorid als Nebenprodukt von Kaliumchlorid in großen Massen produzierte, führte diese kostengünstige Bereitstellung dazu, dass der Marktpreis erheblich sank. Aus diesem Preisverfall folgte auch eine Produktionsreduktion und teilweise Schließung mehrerer Förderaktivitäten in den USA, Russland, Australien, Argentinien und China aufgrund zu hoher Produktionskosten (Ebensperger et al. 2005). Auch die geologische Behörde in den USA, das United States Geological Survey (kurz: USGS) kommt in einer Veröffentlichung über Lithium zu dem Schluss, dass der Lithiummarkt durch die Marktteilnahme von SQM sehr kompetitiv geworden ist (Ober 2003). Der Anstieg ab dem Jahr 2005 ist vor al-

lem in zwei Ursachen begründet: Erstens verursachte der wachsende Industriezweig der Lithium-Ionen-Batterien einen Nachfrageanstieg, der einen Preisanstieg zur Folge hatte, und zweitens gab es eine zunehmende Konzentration des Marktes, die durch die beiden damals größten Lithiumproduzenten SQM und Albemarle (früher Chemetall) dargestellt wurde. Im Jahr 2009, also nach Beginn der Finanzkrise, erreichte der Lithiumpreis seinen Höhepunkt, um dann mit einer gewissen Zeitverzögerung auf die gesunkene Nachfrage mit einem ebenfalls sinkenden Preis zu reagieren (Schmidt 2017).

6.1.2 Aktuelle Preisentwicklung

Die Preisentwicklung von Lithiumcarbonat in den Jahren 2016–2018 ist in Abbildung 6-2 zu sehen. Dabei handelt es sich um die Preise aus großvolumigen, halbjährigen Abnahmeverträgen. Der bereits in der historischen Preisentwicklung zu beobachtende Trend einer Preissteigerung seit 2011 setzte sich in der jüngeren Vergangenheit noch deutlich verstärkter fort. Während der Preis über das Jahr 2016 sich bereits nahezu verdoppelte und Ende 2016 Werte von über 8.000 \$/t erreicht wurden, stieg er im Jahr 2017 noch einmal deutlich auf knapp 18.000 \$/t. Dies entspricht einer Vervierfachung in ca. zwei Jahren. Seit Ende 2017 befindet sich der Lithiumpreis auf einem stabilen Niveau von ca. 17.000 \$/t mit einer leichten Absenkung auf 16.000 \$/t seit August 2018. Der starke Preisanstieg für Lithium seit 2015 ist laut DERA auf die deutlich verstärkte Nachfrage durch Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität zurückzuführen (Al Barazi 2018). Die Stabilisierung des Preises seit 2018 begründet die DERA mit der aktuellen Ausweitung der Lithiumproduktion und damit des Marktangebots. Laut einer aktuellen Studie könnte diese Ausweitung des Angebots sogar zu Überschüssen auf den Märkten führen (Schmidt 2017).

Lithiumpreis 1995–2015 (Lithiumcarbonat – Li₂CO₃)

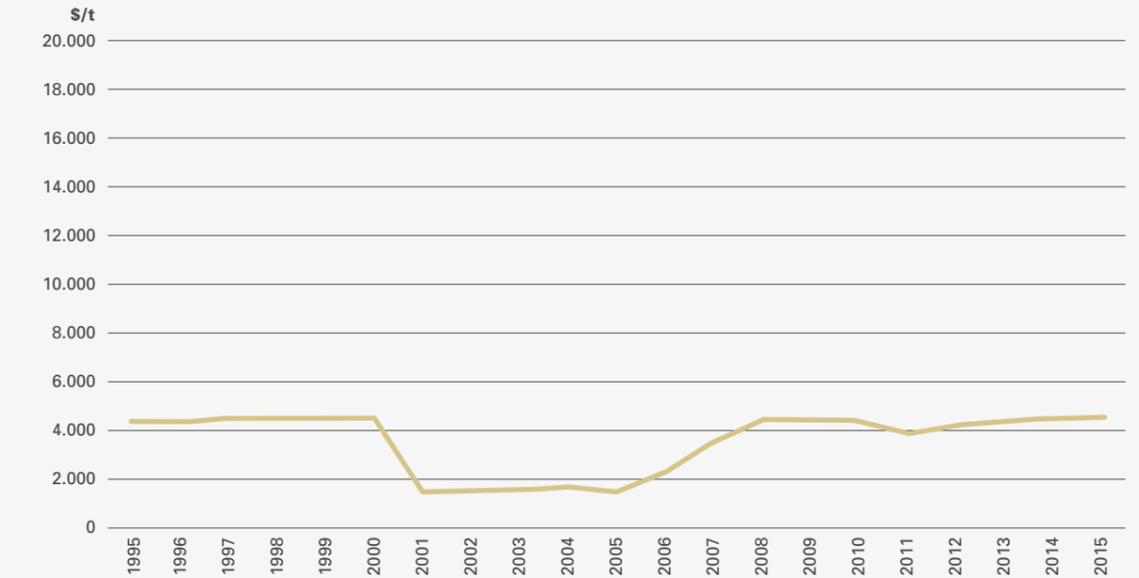


Abbildung 6-1: Historische Preisentwicklung für Lithium 1995–2015

Lithiumpreis 2016–2018 (Lithiumcarbonat – Li₂CO₃)

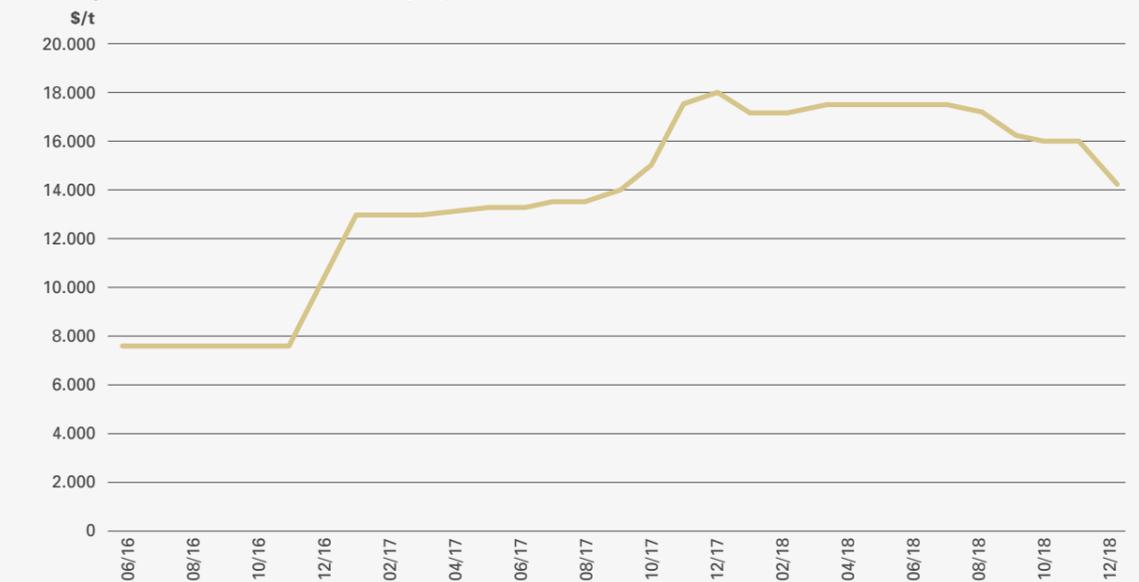


Abbildung 6-2: Aktuelle Preisentwicklung für Lithiumcarbonat 2016–2018

6.1.3 Beiträge zu den Kosten

In Abschnitt 4.1.1 wurden die beiden wesentlichen Arten der Lithiumförderung bereits beschrieben: die Förderung aus Sole und die Gewinnung des Metalls aus Festgestein. Es zeigt sich, dass die Produktionskosten der Lithiumgewinnung aus Festgestein aktuell über denen der Solegewinnung aus dem Salar de Atacama liegen (Schmidt 2017). Abbildung 6-3 zeigt die genannten Unterschiede. Auf der horizontalen Achse ist die gesamte Lithium-Jahresproduktion des Jahres 2016 auf verschiedene Produzenten aufgeteilt. An der Breite der Balken lassen sich die Produktionsmengen der jeweiligen Firmen bzw. Minen ablesen.

Die Produktionskosten der chilenischen Lithiumproduzenten (SQM und Albemarle in Salar de Atacama) liegen demnach mit etwa 2.500–3.000 \$/t deutlich unter den Produktionskosten der australischen Gewinnung aus Spodumen in Greenbushes (ca. 4.500 \$/t). Nach Jeff Desjardins (Desjardins 2015) liegt dies an den tendenziell günstigeren Explorationskosten aufgrund von geringeren logistischen Aufwendungen bei Solen im Vergleich zu Festgesteinsförderung¹² sowie einem einfacheren Genehmigungsverfahren.

Die realisierbare Marge ergibt sich dabei aus der Differenz der Produktionskosten – also der Balkenhöhe – und dem Weltmarktpreis von Lithium (hier: Lithiumcarbonat im Jahr 2016 als gestrichelte horizontale Linie dargestellt). Da die Weltmarktpreise starken Veränderungen unterliegen (Abbildung 6-2 zeigt beispielsweise eine Verdopplung des Lithiumpreises innerhalb von zwei Jahren), die Produktionskosten einzelner Minen aber nicht unmittelbar reduziert werden können, ist es durchaus üblich, dass Minen bei ungünstigen Weltmarktpreisen zeitweise defizitär betrieben werden müssen.

Abbildung 6-4 gibt einen Überblick über die Anteile der einzelnen Prozessschritte an den Gesamtkosten der Lithiumherstellung. Bei beiden Produktionsverfahren stellen die eingesetzten Chemikalien zur Förderung bzw. Aufbereitung des Lithiums den größten Kostenblock dar (54 % bei Solenproduktion bzw. 43 % bei Produktion aus Festgestein). Für das Fördern und Aufbereiten der Sole werden Kosten in Höhe von ca. 16 % der Gesamtkosten fällig, beim Abbau des Festgesteins und der anschließenden Konzentratherstellung ist dieser Anteil mit 21 % etwas höher (Schmidt 2017).

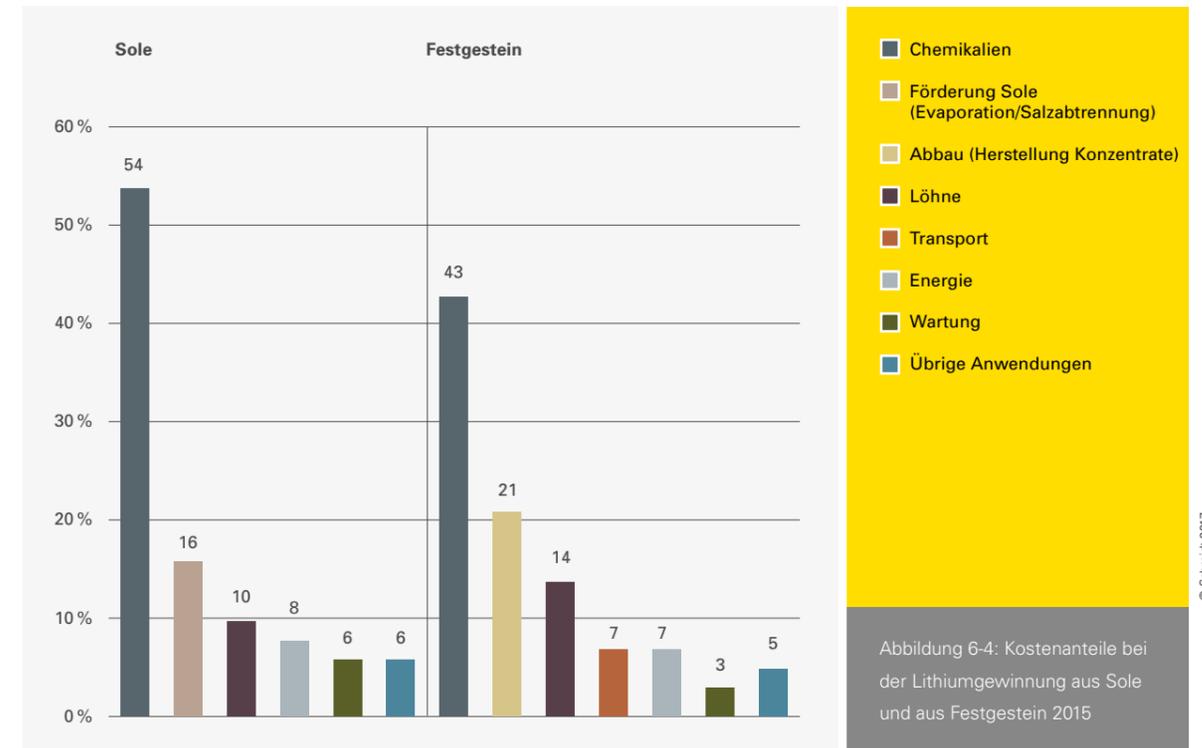


Abbildung 6-4: Kostenanteile bei der Lithiumgewinnung aus Sole und aus Festgestein 2015

© Schmidt 2017

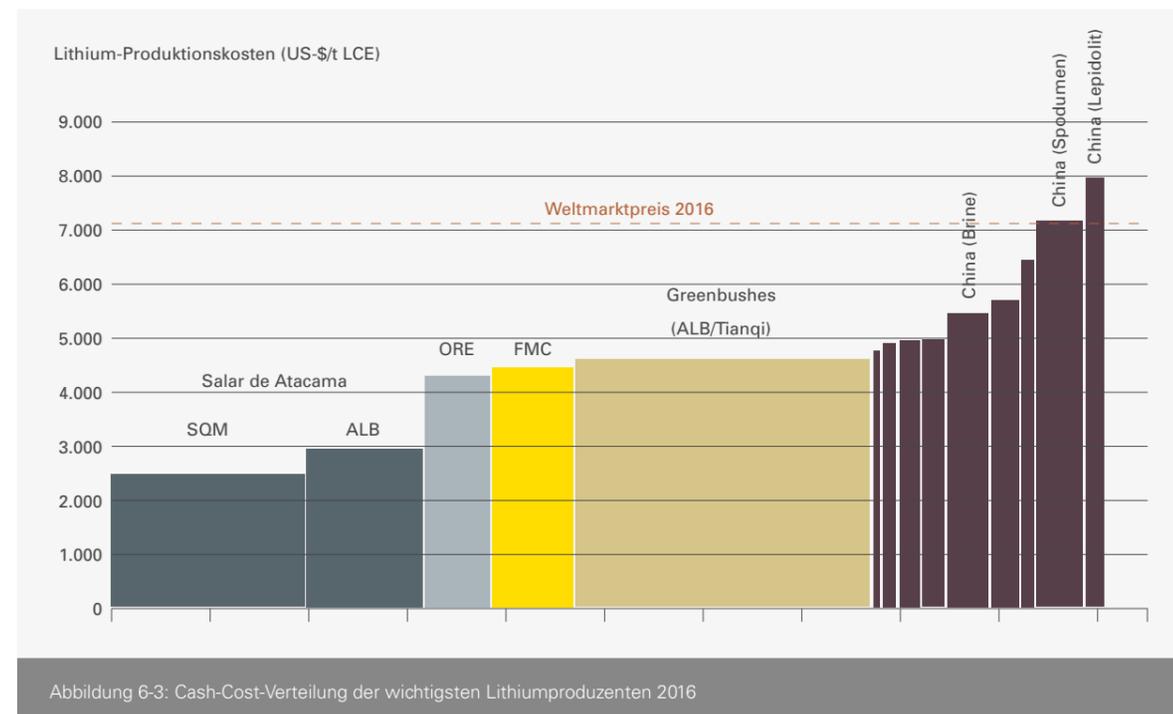


Abbildung 6-3: Cash-Cost-Verteilung der wichtigsten Lithiumproduzenten 2016

© Schmidt 2017

6.1.4 Betrachtung von Angebot und Nachfrage

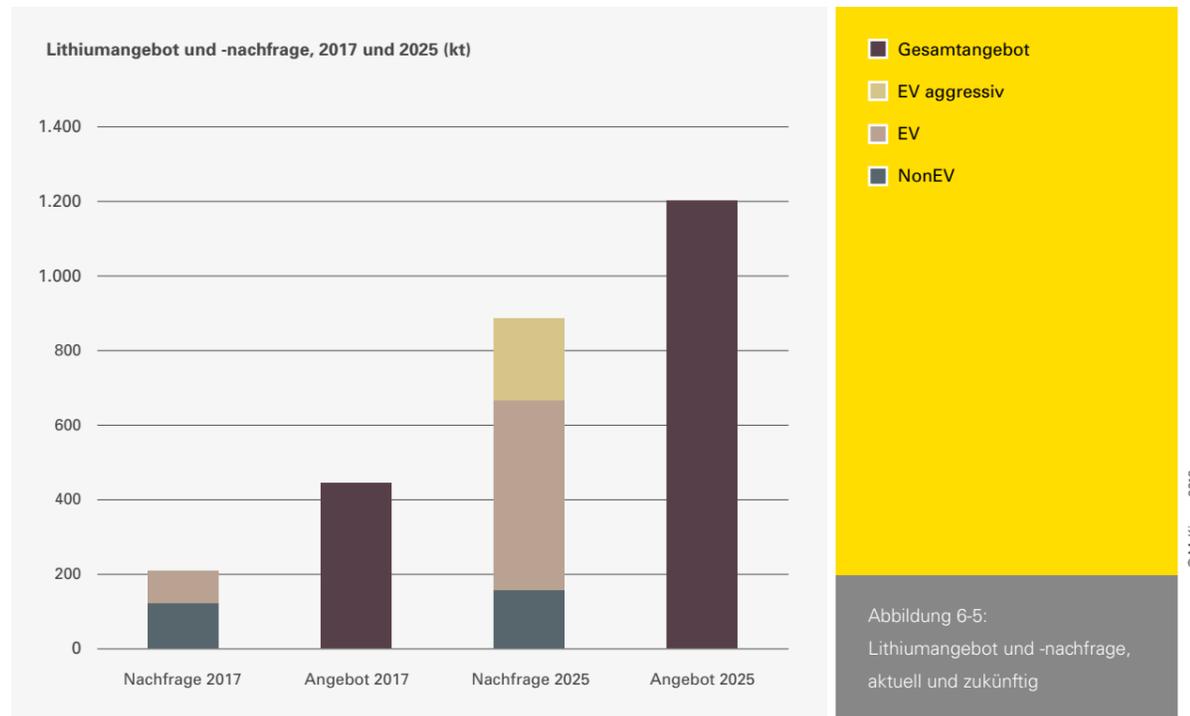
In einem 2017 erschienenen Artikel von McKinsey werden sowohl der zukünftige Lithiumbedarf als auch die Steigerung des Angebots in den kommenden Jahren bis 2025 beleuchtet. Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 6-5 dargestellt (McKinsey 2018).

Basis für die Berechnung der Nachfrage ist eine Erhöhung der globalen Produktion von Batterie- und Hybrid-Elektrofahrzeugen von ca. 1 Mio. Fahrzeugen 2016 auf ca. 13 Mio. Fahrzeuge (BEV-Anteil: 46 %) im Jahr 2025. Auf Grundlage dieser Annahme (Referenzfall) wird die Nachfrage von ca. 200kt im Jahr 2017 auf über 600kt im Jahr 2025 steigen. In einem weiteren untersuchten Fall („EV aggressiv“) wird die globale Produktion von Elektrofahrzeugen sogar mit ca. 18 Mio. angenommen, wodurch die Lithiumnachfrage dann fast 900kt betragen würde. Dabei sei angemerkt, dass der zusätzliche zukünftige Bedarf laut McKinsey fast ausschließlich durch die Entwicklung der Elektromobilität entstehen wird.

Die untersuchte Entwicklung des Angebots basiert auf der Betrachtung geplanter Fördererweiterungen und neu beginnender Förderaktivitäten. Laut McKinsey kann der zukünftige Bedarf, wie in Abbildung 6-5 zu sehen, durch die zusätzlichen Produktionskapazitäten bis 2025 abgedeckt werden und es sollte somit nicht zu Verknappungen kommen. Dies gilt selbst dann, wenn ein beschleunigter Ausbau der Elektromobilität zu Grunde gelegt wird („EV aggressiv“-Szenario). Folglich sagen die Autoren des Artikels einen relativ stabilen Preisverlauf bis zum Jahr 2025 voraus (McKinsey 2018).

Auch andere Einschätzungen kommen zu dem Schluss, dass das zukünftige Lithiumangebot den Bedarf decken kann. In einer Untersuchung der Kritikalität verschiedener Rohstoffe schätzt eine Studie der Europäischen Kommission die Auslastung vorhandener Produktionskapazitäten in den nächsten zehn Jahren auf 50–60 % (European Commission 2017a). Auch in einem Bericht der BGR wird das Rohstoffrisiko von Lithium für die kommenden Jahre als gering eingestuft, selbst in Szenarien mit hoher Wachstumsrate reichen die geplanten Kapazitäten aus, um die Nachfrage bis 2025 zu decken (Schmidt 2017). Eine ähnliche Einschätzung findet sich

12 | Solen sind meist in flachen, leicht zugänglichen Regionen zu finden.



auch in Medienberichten wieder. So ist beispielsweise laut der Internetplattform Mining Weekly trotz des steigenden Bedarfs durch die Elektromobilität mit einem Überangebot an Lithium auf dem Weltmarkt zu rechnen (Mining Weekly 2018).

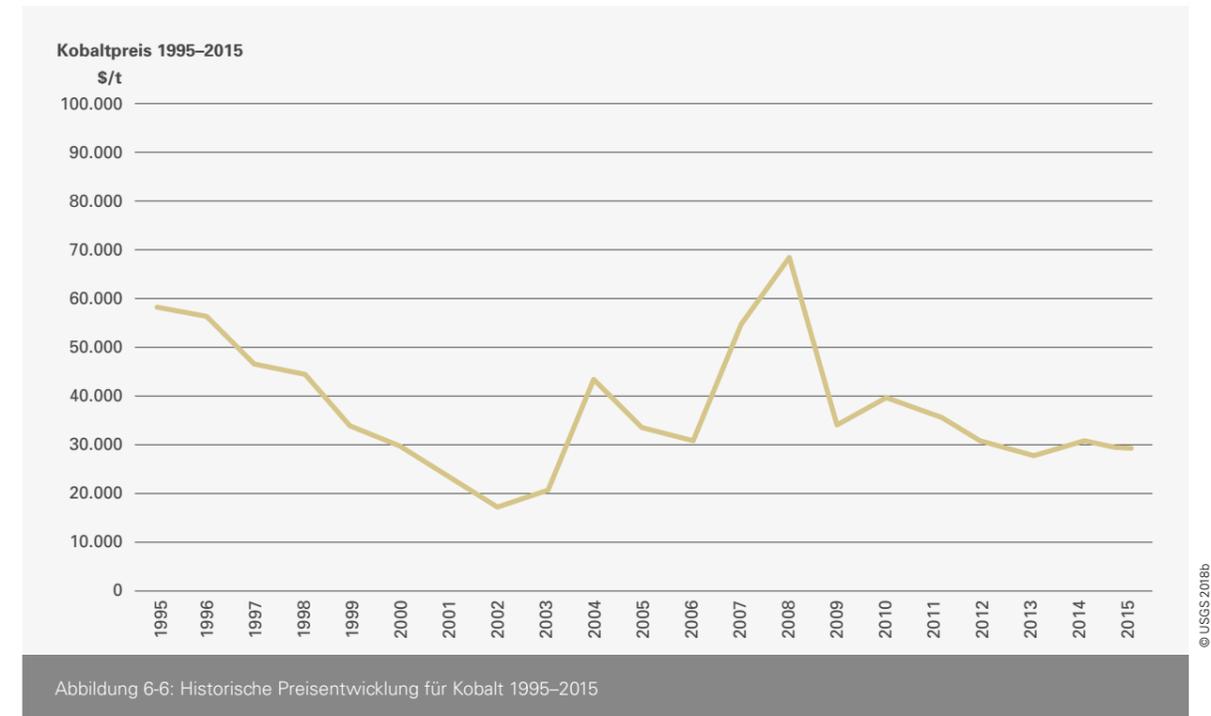
6.2 Kobalt

6.2.1 Historische Preisentwicklung

Abbildung 6-6 zeigt die Entwicklung des Kobaltpreises im Zeitraum 1995–2015. Wie im vorigen Kapitel bereits dargestellt (Abschnitt 5.3), wird die Kobaltförderung schon seit einigen Jahren von der DR Kongo dominiert. Eine solche Marktdominanz sorgt für eine erhöhte Preisabhängigkeit von der politischen und wirtschaftlichen Situation sowie den Entwicklungen des Landes. Kobalt geht als Nebenprodukt aus der Kupfer- und Nickelproduktion hervor, weshalb hier eine weitere Abhängigkeit von Angebot und Nachfrage auf den Märkten dieser Metalle besteht, die steile Preisausschläge bedingen kann.

In der Preisentwicklung für Kobalt geht die steigende Förderung mit einem Preisrückgang bis zum Jahr 2002 einher, der dann durch einen Anstieg und eine Preisspitze im Jahr 2004 zunächst beendet wurde. Dieses Preishoch ist laut Medieneinschätzungen durch die Nachfragesteigerung seitens chinesischer und japanischer Batteriehersteller von jährlich ca. 20 % sowie die Vermutung bedingt, dass sich China darüber hinaus auch mit dem Metall bevorratet haben könnte (Claasen 2004).

Nach der beschriebenen Preisentwicklung stieg der Kobaltpreis erneut stark an und wurde durch die Entwicklungen während der Weltwirtschaftskrise gebremst. Seitdem bewegt sich der Preis auf einem gleichbleibenden Niveau. Im Verlauf des Jahres 2018 hat die DR Kongo die Lizenzgebühren für den Kobaltabbau zunächst von 2 % auf 3,5 % und im Dezember abermals auf nun 10 % angehoben und somit vervielfacht, wodurch ein direkter Einfluss auf den Kobaltpreis zu erwarten ist (Werwitzke 2018).



6.2.2 Aktuelle Preisentwicklung

Die volatile Preisentwicklung für Kobalt in den Jahren 2016–2018 ist in Abbildung 6-7 zu sehen. Während die Entwicklung von 2010–2015 einem leicht fallenden Trend folgte, erhöhte sich der Kobaltpreis seit 2016 zunächst wieder. Der Anstieg gipfelte in Preisen von über 90.000 \$/t im Frühjahr 2018, was eine Vervierfachung des Preises während eines Zeitraums von zwei Jahren bedeutet und selbst das Vorkrisenniveau übersteigt. Bis Ende 2018 sank der Preis dann wieder auf Werte zwischen 50.000 und 60.000 \$/t. Nach dem in Abbildung 6-7 dargestellten Jahreswechsel 2018/19, der für alle Materialien im Rahmen dieser Studie als Stichtag dient, brach der Kobaltpreis abrupt auf ein Niveau zwischen 40.000 und 45.000 \$/t ein und sank daraufhin bis Mitte Februar auf rund 30.000 \$/t.

Wie bereits dargestellt, ist Kobalt als Nebenprodukt direkt an die Förderung von Kupfer und Nickel gekoppelt. Eine Einstellung oder Reduzierung von Kupfer- oder Nickelproduktion kann somit auch erheblichen Einfluss auf das weltweite Angebot an Kobalt und somit den Kobaltpreis haben. Laut BGR

könnte der steile Preisanstieg Anfang 2017 auf Schließungen von Nickelraffinerien in Australien und Brasilien sowie Bergwerken in der DR Kongo im Jahr 2016 zurückzuführen sein (Al Barazi et al. 2017).

Einen weiteren Grund für die Preissteigerung für Kobalt im Jahr 2017 könnte laut DERA die zunehmende Produktion von Tesla darstellen. Der weitere Anstieg bis Mitte 2018 ist laut derselben Quelle auf die allgemeine Nachfragesteigerung durch die Elektromobilität zurückzuführen (Al Barazi 2018).

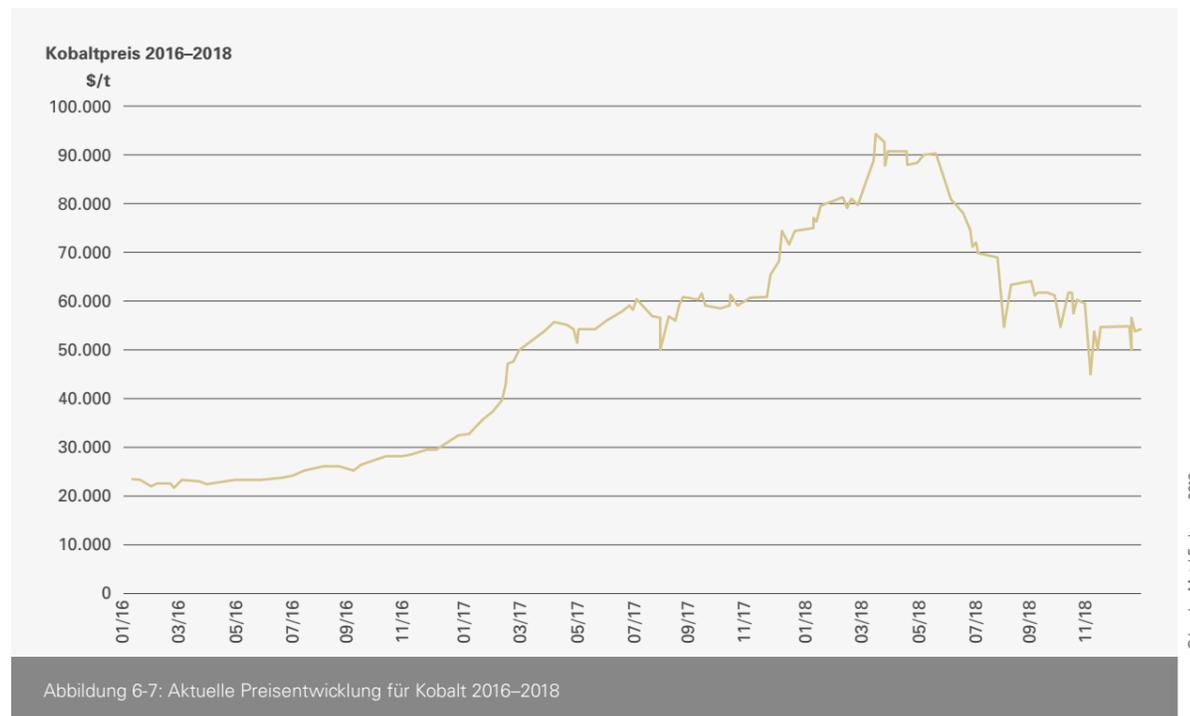


Abbildung 6-7: Aktuelle Preisentwicklung für Kobalt 2016–2018

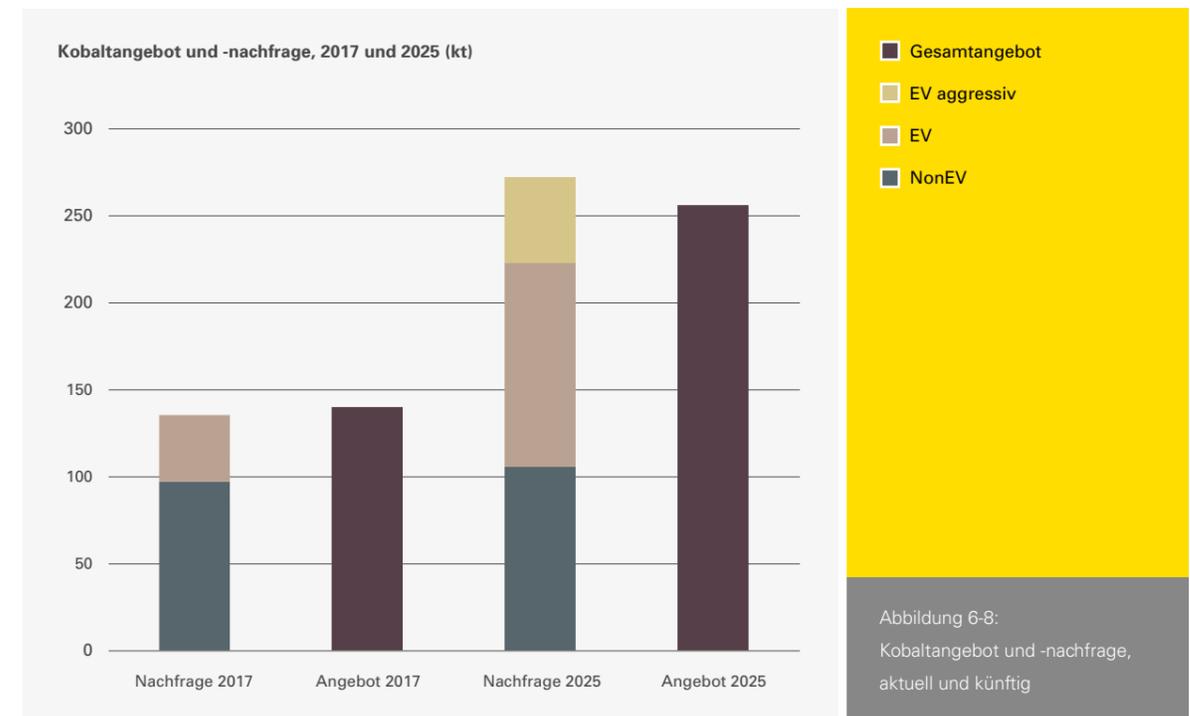


Abbildung 6-8: Kobaltangebot und -nachfrage, aktuell und künftig

6.2.3 Beiträge zu den Kosten

Eine detaillierte Aufschlüsselung der Kostenbestandteile wie für Lithium (siehe Abbildung 6-4) liegt für Kobalt nicht vor. Wie bereits beschrieben, wird Kobalt hauptsächlich im Rahmen der Nickel- und Kupferförderung produziert, nur 2 % der Förderung ist dezidierte Kobaltförderung. Es ist daher anzunehmen, dass die relativen Kostenanteile entlang der Wertschöpfungskette von Kobalt ähnlich derer von Kupfer und Nickel sind (siehe Abschnitte 6.3.3 und 6.6.3).

6.2.4 Betrachtung von Angebot und Nachfrage

In der zuvor bereits erwähnten Veröffentlichung von McKinsey wird auch Kobalt nebst der zukünftigen Entwicklung von dessen Angebot und Nachfrage thematisiert (McKinsey 2018). Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 6-8 dargestellt.

Auf Basis der Annahmen bezüglich der Entwicklung der Elektromobilität (Erhöhung der globalen Produktion von Batterie- und Hybrid-Elektrofahrzeugen von ca. 1 Mio. 2016 auf

ca. 13 Mio. im Jahr 2025 im Referenzfall) wird die zukünftige Nachfrage nach Kobalt abgeschätzt. Unter Zugrundelegung der getroffenen Annahmen erhöht sich die Nachfrage bis 2025 auf ca. 220 kt. Wie bei Lithium ist dies fast ausschließlich auf den Ausbau der Elektromobilität zurückzuführen, so die Autoren. Im Falle eines schnelleren Ausbaus der Elektromobilität („EV aggressiv“-Szenario: globale Produktion von 18 Mio. Elektrofahrzeugen im Jahr 2025) beträgt der Kobaltbedarf sogar über 270 kt.

Das Angebot an Kobalt, das auf Basis geplanter Ausbaumaßnahmen und der Erschließung neuer Produktionsstätten abgeschätzt wurde, betrug laut McKinsey bereits 2017 mit 140 kt nur wenig mehr als die nachgefragte Menge. Im Referenzfall würde das zukünftige Angebot noch zur Deckung der Nachfrage im Jahr 2025 reichen. Betrachtet man jedoch einen schnelleren Ausbau der Elektromobilität („EV aggressiv“ in Abbildung 6-5), könnte es durchaus zu der Situation kommen, dass mehr Kobalt benötigt und die Bereitstellung nicht ausreichen würde. Kurz- und mittelfristige Auswirkungen auf den Preis sind daher für Kobalt zumindest deutlich wahrscheinlicher als bei Lithium (siehe Abschnitt 6.1). Laut McKin-

sey kann jedoch aufgrund des komplexen Zusammenhangs von Kobalt als Nebenprodukt der Nickel- und Kupferproduktion mit der Preisentwicklung genau dieser Metalle keine belastbare Aussage zur Preisentwicklung getroffen werden. In jedem Fall sehen die Autoren eine hohe Wahrscheinlichkeit eines volatilen Preisverlaufs, wie er bereits in der Vergangenheit beobachtet wurde.

6.3 Nickel

6.3.1 Historische Preisentwicklung

Der Nickelpreis hat sich im Zeitraum von 1995 bis 2015 stark volatil entwickelt. Ab 2001 gab es einen stetigen Anstieg, der 2007 in einem Höchststand von gut 37.000 \$/t endete, um anschließend wieder stark abzufallen (Abbildung 6-9). Als Erklärung für den Preisanstieg kann ein großes Angebotsdefizit in diesem Zeitraum angeführt werden, das die Internationale Studiengruppe für Nickel (INSG) mit mehr als 40.000 fehlenden Tonnen des Metalls beziffert (Claasen 2017). Der zweitgrößte Preispeak, der in Abbildung 6-9 in den Jahren 2010 und 2011 sichtbar ist, könnte laut einem FAZ-Artikel teilweise

Speulationskäufe als Ursache haben, da die Lagerbestände in diesem Zeitraum stark zunahm (O.V. 2010).

6.3.2 Aktuelle Preisentwicklung

Die Preisentwicklung für Nickel in den Jahren 2016–2018 ist in Abbildung 6-10 zu sehen. Nach den zwei im vorherigen Abschnitt erwähnten Preisspitzen im Jahr 2007 sowie in den Jahren 2010 und 2011 hatte der Nickelpreis vor 2016 wieder einen leicht sinkenden Trend. Dies änderte sich im Jahr 2016, seit welchem der Preis bis Mitte 2018 wieder eine ansteigende Tendenz aufwies. Der Anstieg des Nickelpreises ist laut Medienberichten auf die seit 2015 steigende Nachfrage für die Elektromobilität zurückzuführen (Claasen 2017). Der höchste Preis wurde Mitte 2018 mit zeitweise über 15.000 \$/t erreicht. Dieser war jedoch deutlich geringer als die beiden in der historischen Preisentwicklung genannten Spitzenwerte. Ähnlich wie bei Lithium und Kobalt ist der Nickelpreis seit Mitte 2018 wieder gesunken. Zum Jahreswechsel 2018/19 betrug er ca. 11.000 \$/t.

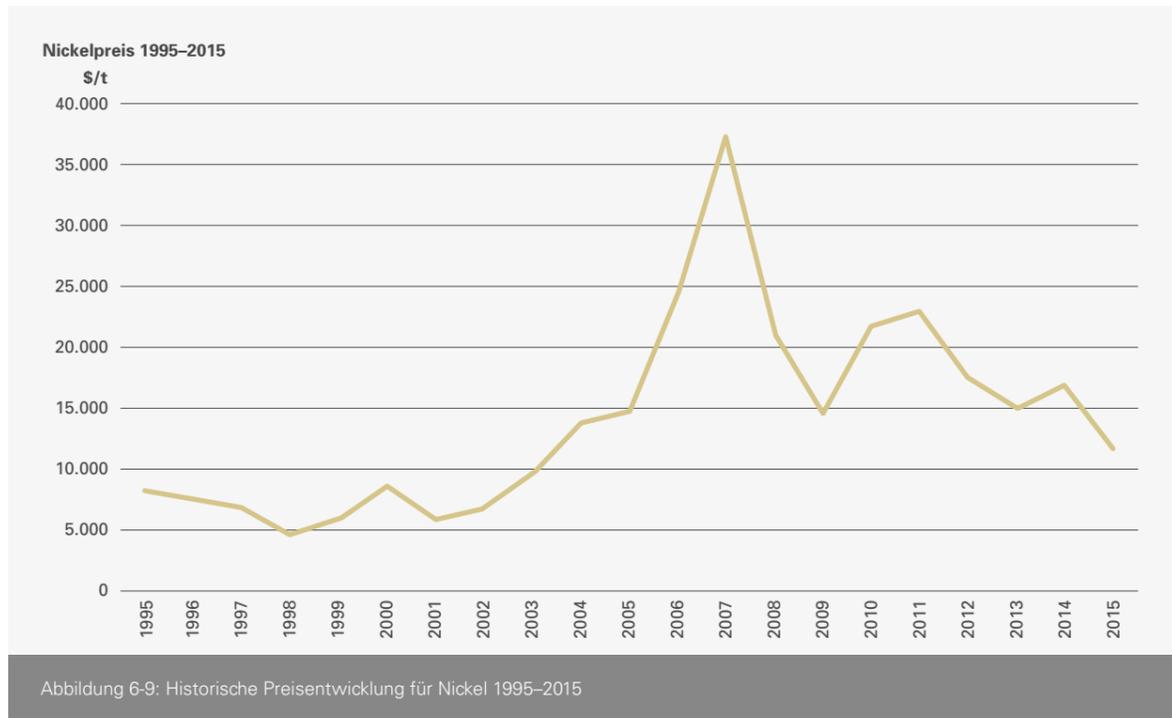


Abbildung 6-9: Historische Preisentwicklung für Nickel 1995–2015

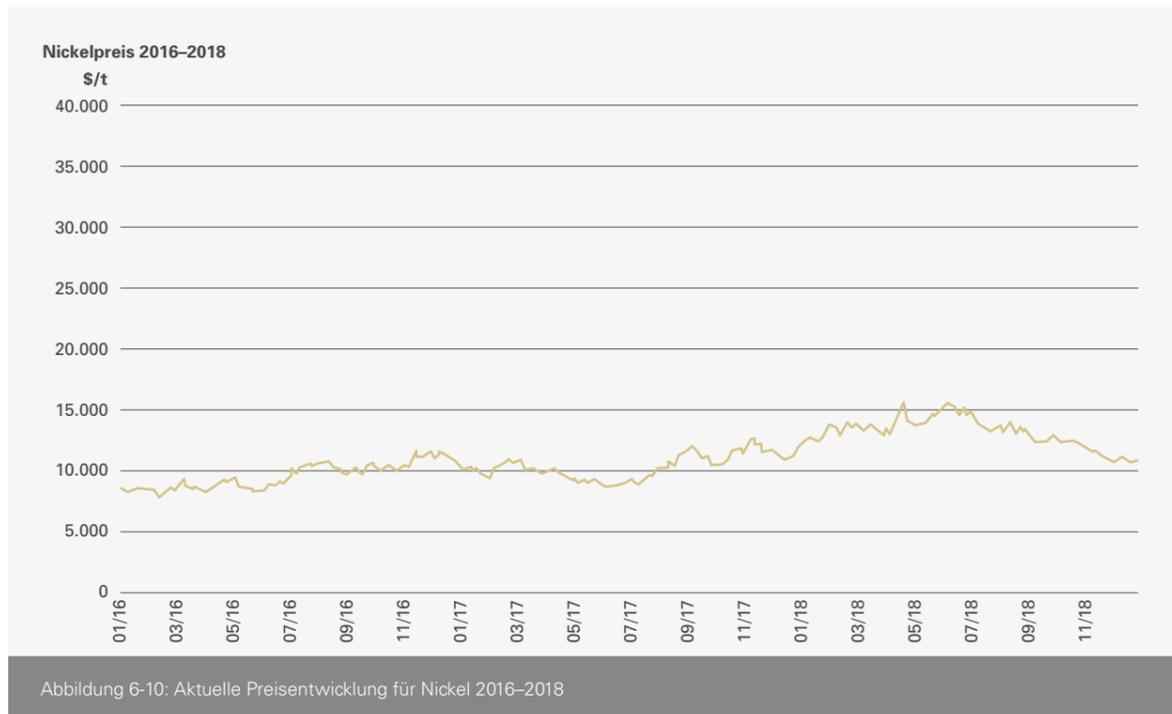


Abbildung 6-10: Aktuelle Preisentwicklung für Nickel 2016–2018

6.3.3 Beiträge zu den Kosten

Wie bereits in Abschnitt 4.3.1 erwähnt wurde, kann Nickel aus verschiedenen Erzen (insb. Sulfide und Laterite) gewonnen werden. Je nach Produktionsverfahren und je nach Herkunft sind daher unterschiedliche Kosten für Prozessenergie, Mitarbeiter, Lizenzen, Chemikalien etc. zu berücksichtigen (Korus 2018). Zudem sind für unterschiedliche Nickelendprodukte (Class I, Class II, NPI) unterschiedlich aufwändige Produktionsprozesse nötig.

In einer Marktanalyse werden die wichtigen Kostenblöcke bei der Förderung von Class-I-Nickel dargestellt (Webb 2018). Es bestätigt sich, dass die Produktion von Class-I-Nickel aus sulfidischen Erzen im Mittel günstiger ist als aus lateritischen (Webb 2018, siehe auch Abschnitt 4.3.1). Die Lohnkosten stellen bei sulfidischen Erzen etwa 26 % der Gesamtproduktionskosten dar, wohingegen sie nur 15 % bei der Förderung von lateritischen Erzen ausmachen. Letztere werden typischerweise im Tagebau abgebaut, wodurch der Aufwand zur Förderung der Erze geringer ist als im Untertagebau, der für den Abbau der sulfidischen Nickelerze teilweise notwendig ist. Werden Laugungsprozesse zur Förderung der lateritischen Erze genutzt (v.a. Limonitgestein, vgl. Abschnitt 4.3.1), kann der Anteil der dafür notwendigen Chemikalien bis zu 35 % der Produktions-

kosten ausmachen (verglichen mit 4 % bei der Förderung von sulfidischen Erzen). Weiterhin sind auch die relativen Energiekosten bei der Förderung der lateritischen Erze mit 12 % der Gesamtkosten deutlich höher als bei der Förderung sulfidischer Erze mit 6 %. Die Kosten zur Behandlung der geförderten Erze machen bei lateritischen Erzen jedoch nur 20 % aus. Bei sulfidischen Erzen betragen diese etwa 40 % der Gesamtproduktionskosten (Webb 2018).

6.3.4 Betrachtung von Angebot und Nachfrage

Die bereits angeführte Veröffentlichung von McKinsey betrachtet auch die zukünftige Entwicklung von Nachfrage und Angebot von Nickel im Hinblick auf den Ausbau der Elektromobilität (McKinsey 2017). Ergebnisse dieser Abschätzung zu Class-I-Nickel im Jahr 2017 und 2025 sind in Abbildung 6-11 dargestellt. Gegenwärtig umfasst die Nachfrage für Batterien der Elektromobilität nur einen kleinen Teil der Gesamtnachfrage nach Nickel (Abschnitt 4.3.2). Laut McKinsey ändert sich dies aber signifikant bis zum Jahr 2025. Durch die gestiegene Nachfrage könnte es dann durchaus zu der Situation kommen, dass die weltweite Nickelproduktion nicht mehr ausreicht, um den entsprechenden Bedarf zu decken. In der Folge könnte es zu signifikanten Preissteigerungen kommen, so die Autoren.

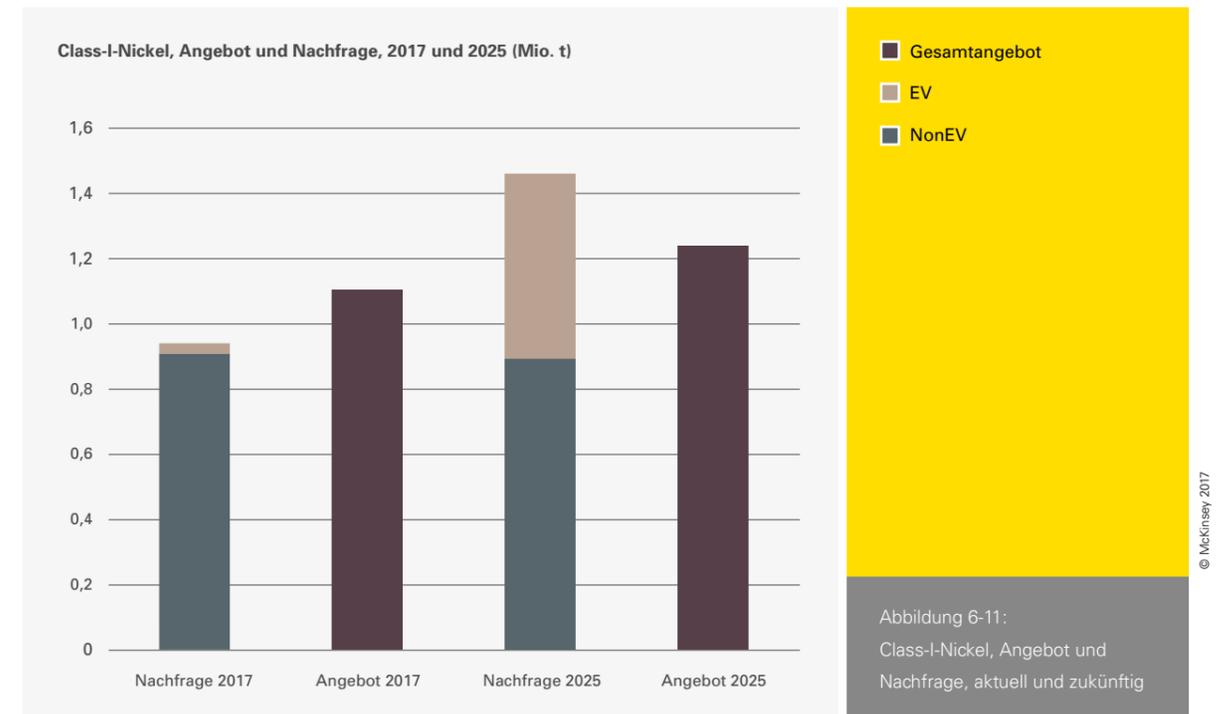


Abbildung 6-11: Class-I-Nickel, Angebot und Nachfrage, aktuell und zukünftig

6.4 Platin und Platingruppenmetalle

6.4.1 Historische Preisentwicklung von PGM

Wie in Abbildung 6-12 dargestellt, hat sich der Preis für PGM im Zeitraum 1995–2015 äußerst volatil verhalten. Absolut gesehen hat sich der nominale Preis zwischen 7,2 Mio. \$/t und 25,0 Mio. \$/t bewegt, was einen Anstieg auf bis zu 350 % bedeutet. Aufgrund der Rolle von Südafrika nehmen die Entwicklungen in diesem Land einen großen Einfluss auf die globale Preisbildung der PGM. Beispielsweise führten Lohnsteigerungen über der Inflationsrate sowie Strompreiserhöhungen in Südafrika während der Jahre vor 2008 zu Preissteigerungen der Metalle (PwC 2016). Allgemein ist der Platinpreis jedoch von vielen Faktoren abhängig – laut Aussagen von Investoren neben der Situation in Südafrika auch von der Situation der Automobilindustrie, dem wichtigsten Anwendungssektor von PGM (Abschnitt 4.4.2), technologischen Entwicklungen sowie der Verwendung von Substituten (Cummins 2015).

Im Jahr 2008 brach der Preis mit der weltweiten Finanzkrise ein und notierte an der New Yorker Handelsbörse einen Tiefstand. Zu Beginn des Jahres 2013 stieg der PGM-Preis leicht an. Zu diesem Zeitpunkt machte das Unternehmen Anglo American eine Entscheidung öffentlich, die die Reduktion seines PGM-Förderziels umfasste und den Abbau von 14.000 Stellen zur Folge hatte (Putsch 2013). Der abrupte Fall des Preises im Jahr 2015 ist zumindest teilweise auf den Manipulationsskandal bei VW zurückzuführen, der einen Nachfrageeinbruch bei Dieselfahrzeugen und somit einen geringeren Bedarf für entsprechende Katalysatoren nach sich zog (O.V. 2015; Johnson Matthey 2018).

6.4.2 Historische Preisentwicklung für Platin

An dieser Stelle soll auch auf die historische Preisentwicklung für Platin in den Jahren 1995–2015 eingegangen werden, die in Abbildung 6-13 zu sehen ist. Hier sei auf den Unterschied zu den im vorherigen Abschnitt dargestellten historischen PGM-Preisen hingewiesen. Während bei diesen ein Mittelwert

über alle PGM dargestellt wird, handelt es sich in Abbildung 6-13 ausschließlich um den Nominalpreis für Platin.

Platin zeigt aufgrund seiner Bedeutung für den PGM-Preis allerdings einen in Teilen dem Preisverlauf aller PGM ähnlichen Verlauf. So ist auch hier ein Anwachsen und erneutes Abfallen des Preises in den Jahren 2000–2002 zu sehen. In den Jahren 2002–2008 wurde allerdings ein kontinuierliches und deutlich stärkeres Wachstum des Preises als für den PGM-Durchschnitt beobachtet. Dieses gipfelte in Preisen von fast 70 Mio. \$/t im Jahr 2008, bevor im Zuge der weltweiten Finanzkrise im Jahr 2009 der Preis auf unter 30 Mio. \$/t fiel. Ebenso wie bei dem Durchschnitt der PGM erholte sich der Preis in den darauffolgenden zwei Jahren wieder und stieg bis auf knapp unter 60 Mio. \$/t im Jahr 2011. Seitdem ist ein eher abfallender Trend zu beobachten, der sich auch in der aktuellen Preisbetrachtung im nachfolgenden Abschnitt in den Jahren 2016–2018 fortsetzt.

6.4.3 Aktuelle Preisentwicklung

Die Preisentwicklung für Platin in den Jahren 2016–2018 ist in Abbildung 6-14 zu sehen. Seit 2016 zeigt sich ein recht stabiler Verlauf mit leicht sinkender Tendenz des Platinpreises. Im Vergleich zum Preisniveau von 2015 (siehe vorheriger Abschnitt 6.4.2) ist der Preis in der ersten Jahreshälfte von 2016 noch einmal gesunken. Wie bereits erwähnt könnte das auf eine geringere Nachfrage nach Dieselfahrzeugen und damit von Platin für entsprechende Katalysatoren zurückzuführen sein. Während im August 2016 ein Maximum von über 35 Mio. \$/t zu sehen ist, betrug der Preis zum Jahreswechsel 2018/19 ungefähr 27 Mio. \$/t.

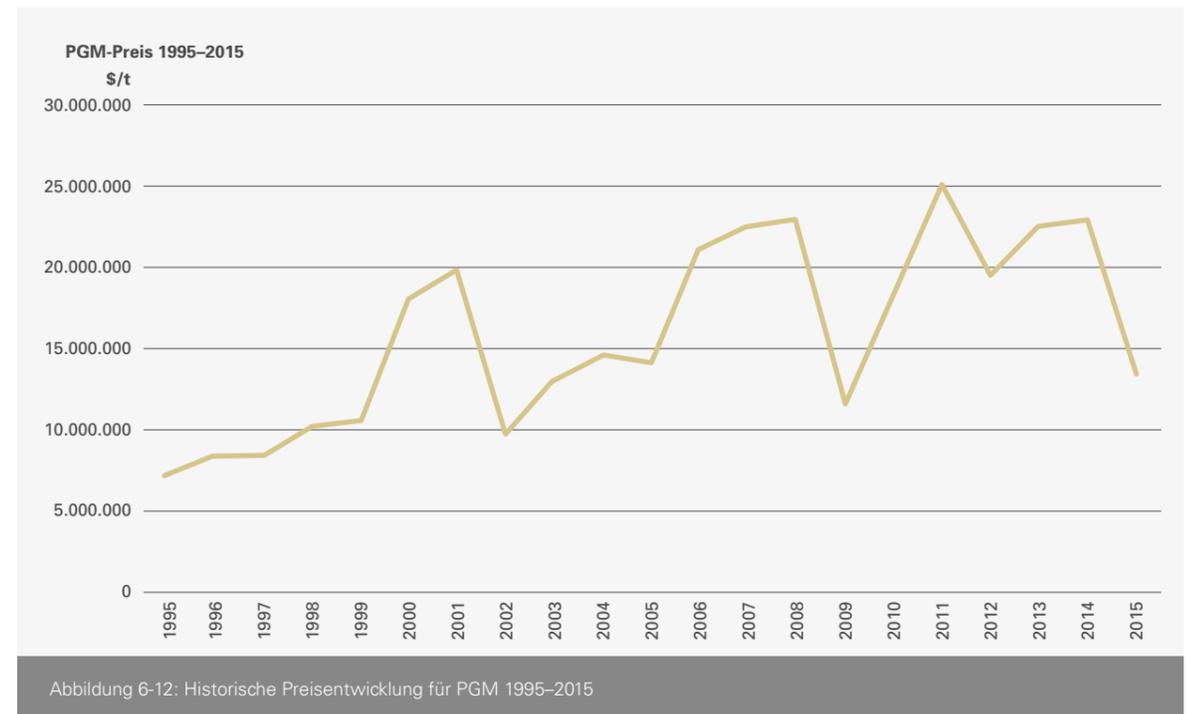


Abbildung 6-12: Historische Preisentwicklung für PGM 1995–2015

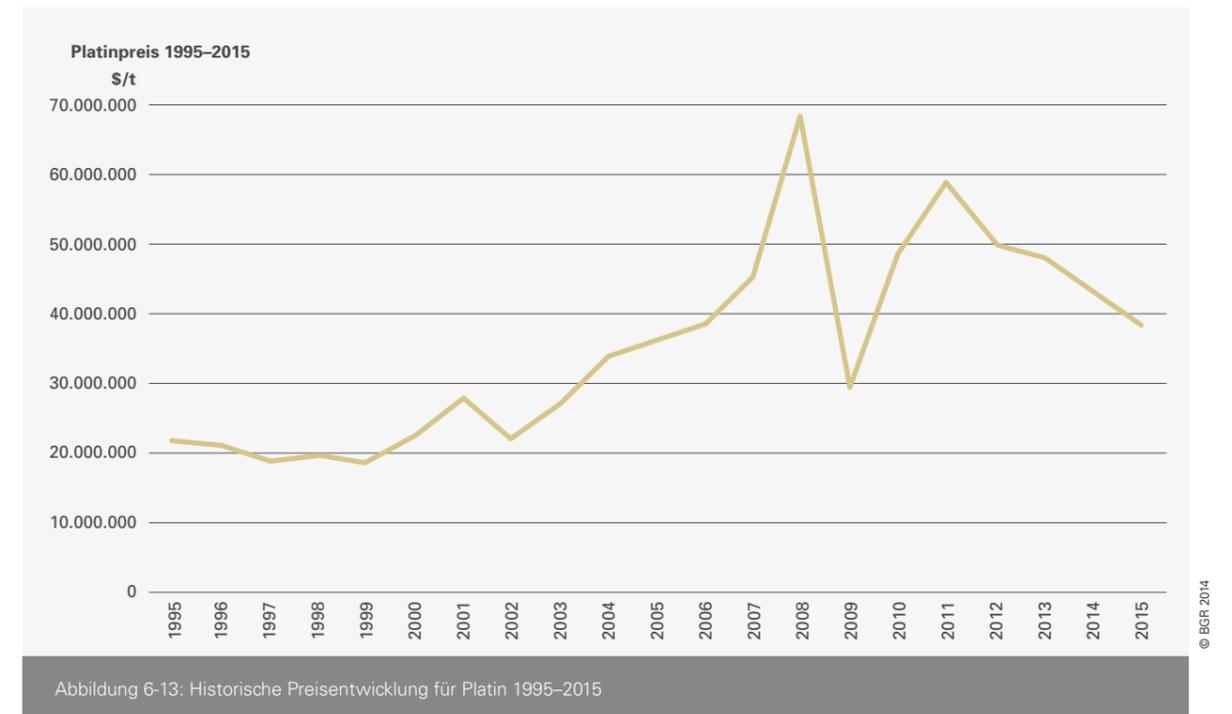


Abbildung 6-13: Historische Preisentwicklung für Platin 1995–2015

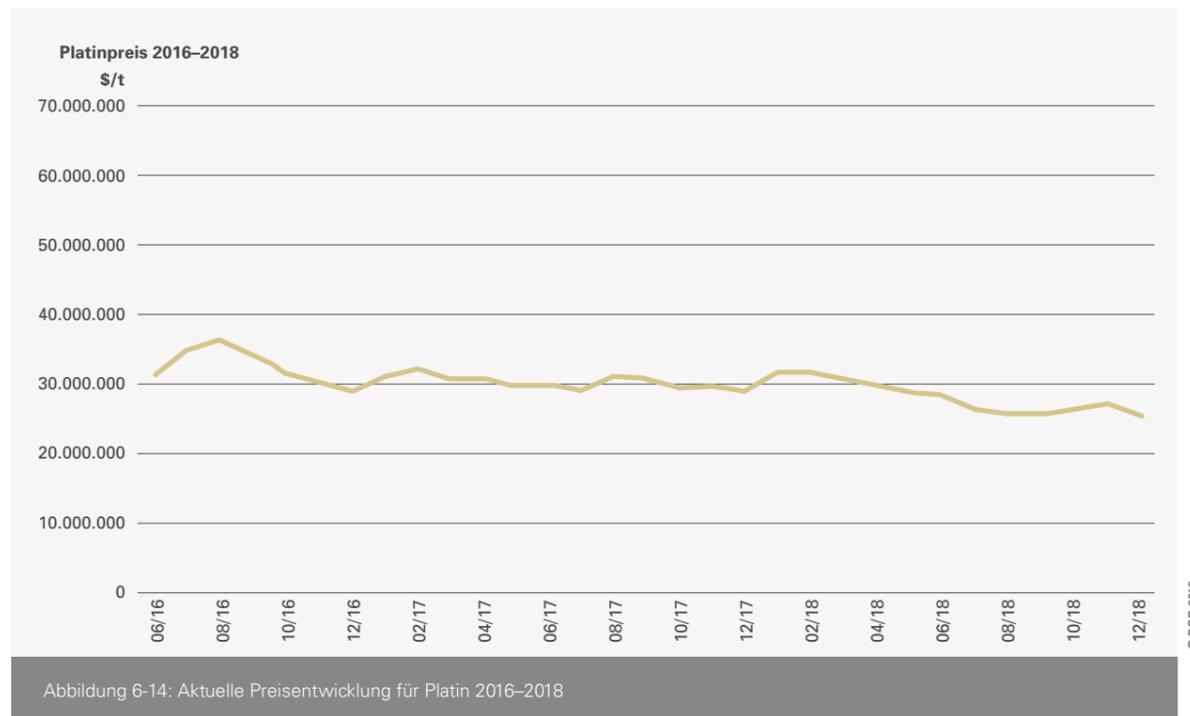


Abbildung 6-14: Aktuelle Preisentwicklung für Platin 2016–2018

© BGR 2018c

6.4.4 Beiträge zu den Kosten

Die verschiedenen Platingruppenmetalle kommen wie in Abschnitt 4.4.1 bereits beschrieben in aller Regel vergesellschaftet im Erz vor. Eine Beschreibung der Kostenbestandteile wird daher an dieser Stelle auf Basis aller gesamten PGM vorgenommen. Der Großteil der PGM-Kosten entfällt nach den Angaben von Anglo American (Anglo American 2015a) mit 68 % auf den Bergbau, sprich die Förderung des Erzes. Dabei haben die Lohnkosten sowie der Rohstoffgehalt im Erz einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten. Der Wert des gefördert Erzes beträgt bereits nach dem Bergbau etwa 50 % des Endwertes. Ein Handel von PGM-Erzen existiert jedoch kaum (European Commission 2017b). Die Verarbeitung findet stattdessen meist im fördernden Unternehmen statt. Aufkonzentrierung des Erzes und Verhüttung machen weitere 28 % der Gesamtkosten aus. Die abschließende Verarbeitung zum Basismetall (hochkonzentrierte, aber weiterhin vermischte PGM) und die Herauslösung der einzelnen Bestandteile Platin, Palladium etc. machen hingegen nur etwa 4–5 % der Gesamtkosten aus (Anglo American 2015a).

6.4.5 Betrachtung von Angebot und Nachfrage

In einem Synthesepapier des Öko-Instituts im Auftrag der Agora Verkehrswende wird die zukünftige Nachfrage nach Platin und anderen für die Elektromobilität kritischen Rohstoffen untersucht (Öko-Institut 2017). Laut der Untersuchung könnte sich die Nachfrage von ca. 75 t im Jahr 2015 (Bedarf für Katalysatoren in herkömmlichen Verbrenner-PKW) auf über 110 t im Jahr 2030 entwickeln. Diese Entwicklung ist jedoch stark abhängig von dem Maße, in dem sich Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge etablieren. Weiterhin könnte der Bedarf auch deutlich steigen, wenn herkömmliche Verbrenner-PKW weiterhin den Markt dominieren, diese jedoch aufgrund politischer Maßnahmen zur Verminderung der Schadstoffausstöße mehr Platin für ihre Katalysatoren benötigen. Andererseits führte der Rückgang der Nachfrage nach Dieselfahrzeugen in den vergangenen Jahren eher zu einer Stagnation bzw. sogar zu einem Rückgang des Platinbedarfs – ebenso wie der zunehmende Einsatz alternativer Abgasreinigungssysteme wie SCR (Johnson Matthey 2018). Für Platin lässt sich laut Agora ein relativ großer Anteil der Nachfrage durch Recycling decken. Während dies 2015 schon bei über 25 % des Bedarfs für Katalysatoren der Fall war, könnten in der Zukunft sogar mehr als 50 % des Bedarfs für

Fahrzeuge (Verbrenner- und Elektrofahrzeuge) durch Sekundärmaterial abgedeckt werden (vgl. auch Abschnitt 8.2). Agora erwartet aufgrund des hohen Angebots aus Recycling sowie der umfangreichen globalen Ressourcen und Reserven keine Verknappung des Metalls. Auch in anderen Quellen wird der steigende Anteil von Platin aus Recycling erwähnt (Johnson Matthey 2018). Laut einer Präsentation von Anglo American aus dem Jahr 2015 arbeiten bei niedrigen Platinpreisen auf dem Weltmarkt viele der existierenden Minen unprofitabel (Anglo American 2015b). Bei anhaltend geringem Platinpreis könnte es daher zu Schließungen von bestehenden Minen bzw. Nichtöffnung von vorher geplanten Produktionskapazitäten kommen, so Anglo American. Schließungen von Kapazitäten könnten einen Einfluss auf das Gesamtangebot auf dem Weltmarkt haben und damit einen Preisdruck erzeugen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die zukünftige Entwicklung von Angebot und Nachfrage und damit der Preis von Platin von mehreren Faktoren abhängig ist. Zum einen ist unklar, wie sich die Nachfrage nach Dieselfahrzeugen und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen entwickelt. Außerdem ist der zukünftige Platinbedarf sowohl für Katalysatoren als auch für Brennstoffzellen eine entscheidende Größe (Abschnitt 10.1). Steigende Nachfrage löst Druck auf den Platinpreis aus, wohingegen ein höherer Anteil von verfügbarem Platin aus Recycling preisdämpfend wirkt.

6.5 Seltenerdmetalle

6.5.1 Historische Preisentwicklung

Die Preisentwicklung der Seltenerdmetalle war in den Jahren 1995–2007 relativ stabil. Im Jahr 2006 führte China erste Exportbeschränkungen für Seltenerdmetalle ein, die im Zuge der darauffolgenden Jahre, insbesondere Ende 2010, deutlich verschärft wurden (Reuters 2010a). Begründet wurden diese Schritte mit der Reduktion der negativen Umweltauswirkungen, z. B. durch das Vorgehen gegen illegale Minen, und der Erteilung von Umweltauflagen. Während die Preise bereits im Jahr 2008 anstiegen, fielen sie zwar mit der Wirtschaftskrise im Jahr 2009 zunächst wieder, jedoch kam es als Reaktion auf die chinesischen Maßnahmen in den folgenden Jahren zu erheblichen Preisanstiegen auf dem Weltmarkt (Bradsher 2012, 2013; Kaiman 2014; Reuters 2010a). Als Reaktion hierauf wandten sich die USA, die EU und Japan im Jahr 2012 an die Welthandelsorganisation (WTO) (AFP 2012). Die WTO kam zu dem Schluss, dass diese Maßnahmen inkonsistent mit den WTO-Regeln seien, woraufhin China die Maßnahmen rückgängig machte und sich der Preis entspannte (WTO 2015).

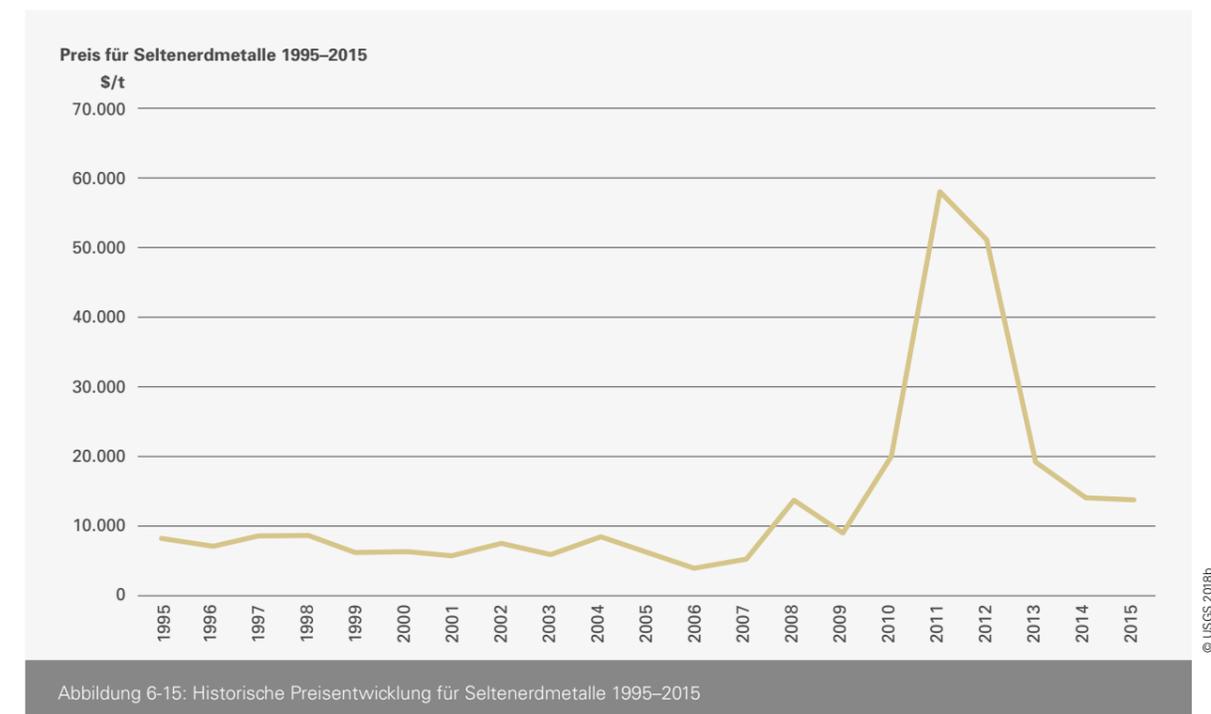


Abbildung 6-15: Historische Preisentwicklung für Seltenerdmetalle 1995–2015

© USGS 2018b

6.5.2 Aktuelle Preisentwicklung für die Seltenerdmetalle Neodym und Dysprosium

Die volatile Preisentwicklung der Seltenerdmetalle Neodym und Dysprosium in dem Zeitraum von Mitte 2016 bis Ende 2018 wird in Abbildung 6-16 und Abbildung 6-17 dargestellt. In dieser Betrachtung wird auch der deutliche Unterschied zwischen Preisen verschiedener Seltenerdmetalle sichtbar. Während der Neodympreis im betrachteten Zeitraum zwischen 50.000 und 90.000 \$/t lag, ergaben sich für Dysprosium im gleichen Zeitraum Preise zwischen 250.000 und 290.000 \$/t. Die Preise von häufigeren Seltenerdmetallen wie Cer oder Lanthan liegen mit Preisen von 1.500 bis 3.000 \$/t bzw. 2.000 bis 4.500 \$/t deutlich darunter (BGR 2018c). Dies sollte bei einer Angabe zu durchschnittlichen Preisen der Seltenerdmetalle stets beachtet werden.

Der Neodympreis beschreibt im Jahr 2016 zunächst einen relativ stabilen Verlauf bei ca. 50.000 \$/t. In der zweiten Jahreshälfte 2017 stieg der Preis innerhalb weniger Monate auf deutlich höhere Werte mit einem Maximalwert von über 90.000 \$/t im September 2017. Innerhalb der drei darauffol-

genden Monate sank der Preis wiederum auf einen Wert von ca. 60.000 \$/t. Dieser Wert entspricht auch ungefähr dem aktuellen Preis für Neodym (Januar 2019).

Der Verlauf des Dysprosiumpreises innerhalb der Jahre 2016–2018 ist in Abbildung 6-17 dargestellt. Die Kurve zeigt für die entsprechenden Zeitperioden ähnliche Entwicklungen wie Neodym. Nachdem mit 250.000 \$/t im Frühjahr der tiefste Preis des Jahres 2017 erreicht wurde, steigt die Kurve in einem sehr ähnlichen Zeitraum wie bei Neodym im Herbst desselben Jahres stark an. Der Maximalwert von 290.000 \$/t wird auch hier im September 2017 erreicht. In den darauffolgenden Monaten sinkt der Preis des Seltenerdmetalls jedoch wieder auf ca. 245.000 \$/t und damit auf den tiefsten Wert innerhalb der betrachteten zwei Jahre.

Neodympreis 2016–2018

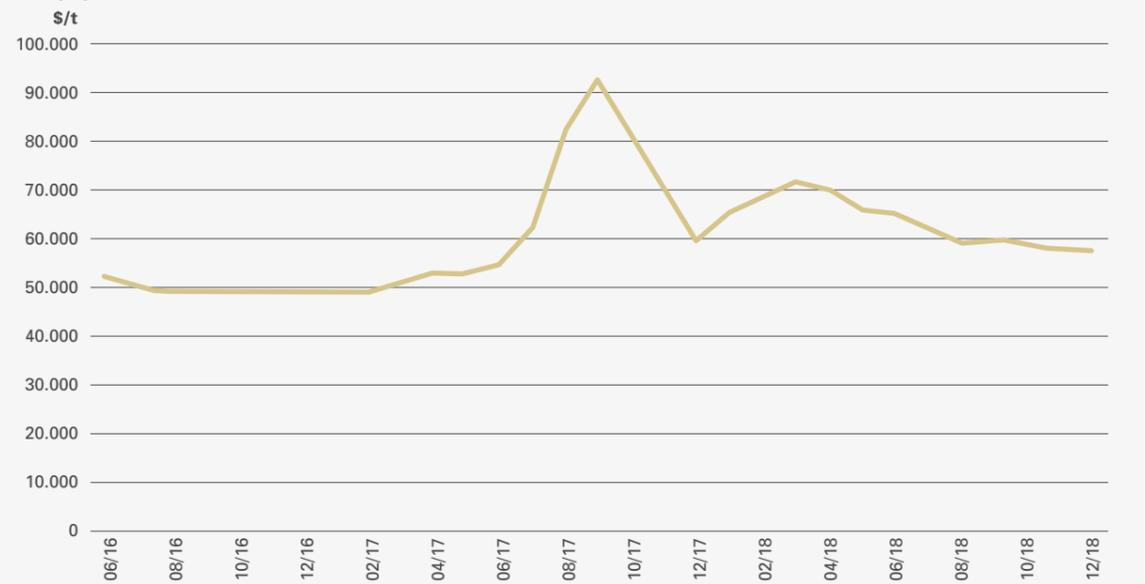


Abbildung 6-16: Aktuelle Preisentwicklung für Neodym 2016–2018

© BGR 2018c

Dysprosiumpreis 2016–2018

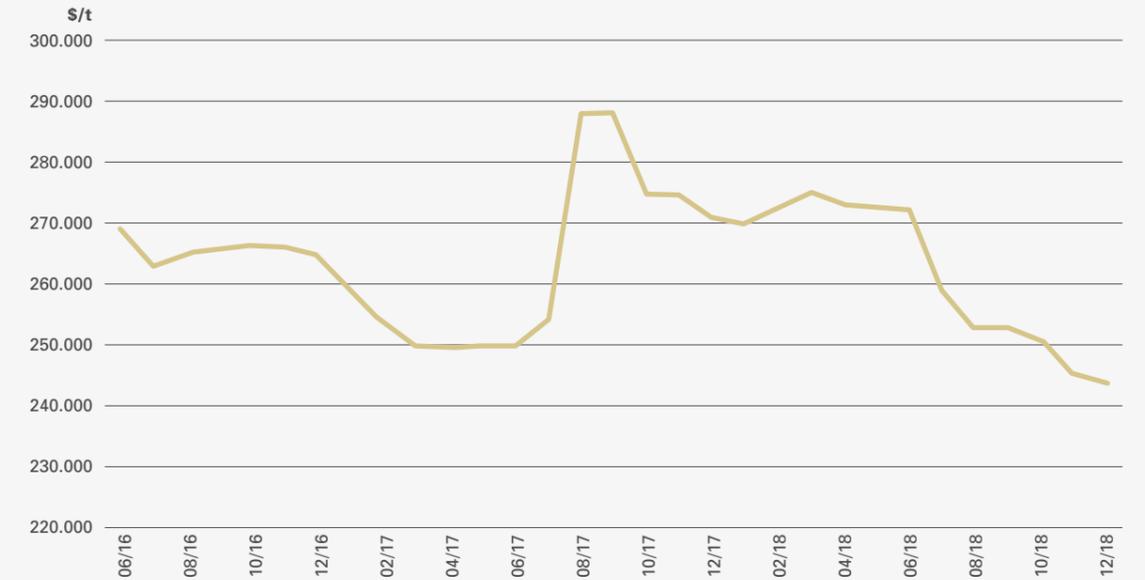


Abbildung 6-17: Aktuelle Preisentwicklung für Dysprosium 2016–2018

© BGR 2018c

6.5.3 Beiträge zu den Kosten

Da der Großteil der Seltenerdproduktion in China und darüber hinaus ein zunehmender Anteil der Wertschöpfungskette in vertikal integrierten Unternehmen stattfindet, lassen sich keine Angaben zu den verschiedenen Kostenbeiträgen finden. Ebenso wenig sind ausreichende Eckdaten auffindbar, auf deren Basis sich eine belastbare Abschätzung der Kostenursachen zur Bereitstellung von Seltenerdmetallen ableiten lassen.

6.5.4 Betrachtung von Angebot und Nachfrage

Eine Einschätzung der zukünftigen Entwicklung von Angebot und Nachfrage von Neodym bzw. Praseodym (das Neodym als Magnetmaterial ersetzen kann, vgl. Abschnitt 3.2) wird zum Beispiel auf der Website des australischen Förderers Arafura vorgenommen (Arafura 2018).

Arafura schätzt die jährliche Wachstumsrate des Bedarfs an Neodym-Eisen-Bor-Magneten bis 2030 mit ca. 5–6 % ein. Das Angebot an Neodym ist laut Arafura stark von möglichen Re-

gulierungen der chinesischen Regierung abhängig. So wurde, wie zuvor bereits beschrieben, in vergangenen Jahren verstärkt die illegale Förderung von Seltenerdmetallen in China bekämpft und höhere umweltschutztechnische Auflagen wurden vorgeschrieben. Seltenerdmetalle aus den genannten illegalen Quellen kamen in der Vergangenheit immer dann auf den Markt, wenn sich die Preise erhöhten, so Arafura. Sollte dies in der Zukunft unterbunden werden und nicht durch eine entsprechende offizielle Angebotsmenge ersetzt werden, könnte sich als Folge ein Preisdruck ergeben (Arafura 2018).

Neben Neodym bzw. Praseodym sind vor allem Dysprosium bzw. Terbium für die Elektromobilität relevante Materialien (vgl. Abschnitt 3.2). In einem Bericht aus dem Jahr 2018 untersuchte Adamas Intelligence die aktuelle und die zukünftige Marktsituation für Dysprosium (Castilloux 2018). Dabei ergibt sich ein ähnliches Bild wie für Neodym. Zum einen wird die Bekämpfung der illegalen chinesischen Produktion und damit ein Rückgang des globalen Angebots von 34 % seit dem Jahr 2013 erwähnt. Zum anderen wird eine Erhöhung des Bedarfs durch die Elektromobilität erwartet.

Eine weitere wichtige Quelle zur Gegenüberstellung von Angebot und Nachfrage stammt von Dudley Kingsnorth. Er rechnet für die nahe Zukunft (2020) damit, dass der Bedarf an Neodym das entsprechende Angebot leicht übersteigt, wohingegen das Angebot von Dysprosium ausreichen sollte, um den Bedarf zu decken (Kingsnorth 2018).

6.6 Kupfer

6.6.1 Historische Preisentwicklung

Der Kupferpreis und dessen Entwicklung ist insofern eine interessante Größe, als er von manchen als Indikator für die aktuelle globale Wirtschaftssituation angesehen wird (Groth 2015). Während der Preis bis zum Jahr 2003 eine fallende Tendenz aufwies, verzeichnete er ab 2003 einen starken Anstieg mit einem Spitzenstand von 7.230 \$/t im Jahr 2007 (Abbildung 6-18). Der Zeitpunkt des anschließenden Preiseinbruchs im Jahr 2009 fällt mit der Weltwirtschaftskrise zusammen. Ein noch höheres Maximum wurde im Jahr 2011 mit 8.950 \$/t erreicht.

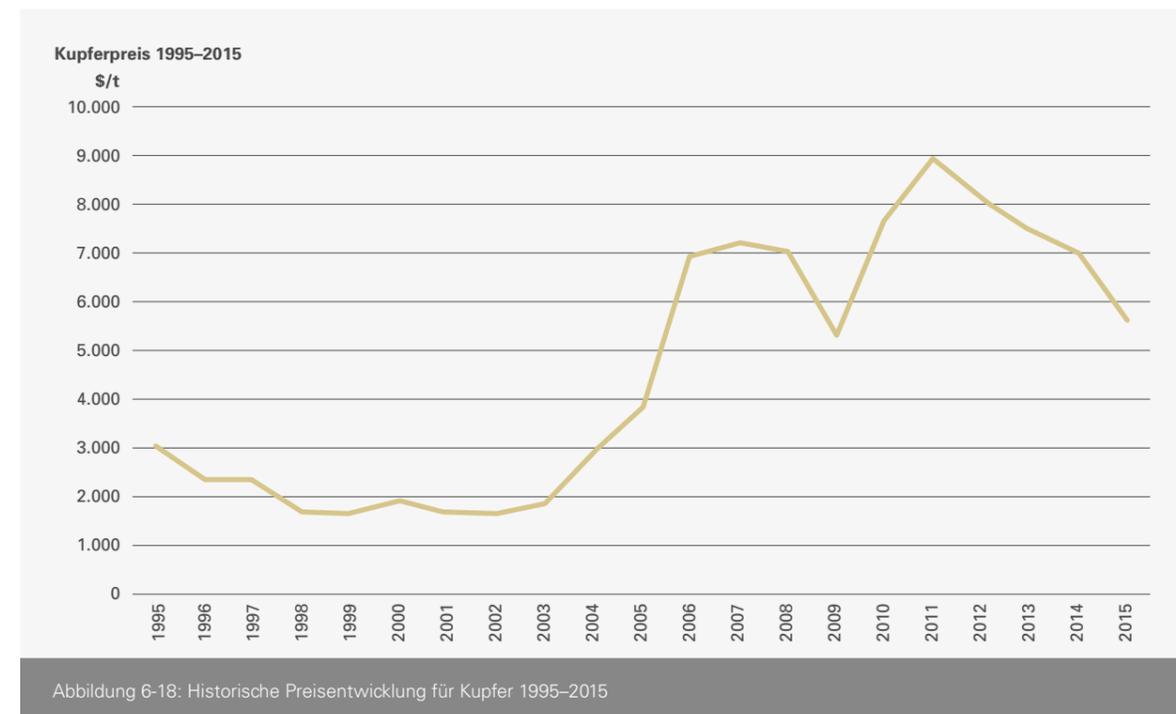


Abbildung 6-18: Historische Preisentwicklung für Kupfer 1995–2015

© USGS 2018b

6.6.2 Aktuelle Preisentwicklung

Die Preisentwicklung für Kupfer in den Jahren 2016–2018 ist in Abbildung 6-19 dargestellt. Wie bei Nickel ist seit 2016 ein Verlauf hin zu höheren Preisen bis Mitte 2018 zu erkennen. Der Verlauf ist gekennzeichnet von zwei deutlichen Anstiegen im Oktober 2016 und von Juli bis September 2017. Nach dem bis Mitte 2018 anhaltenden Preisplateau um einen Preis von ungefähr 7.000 \$/t ist, ähnlich wie bei Nickel und Kobalt, ein Absinken des Preises bis zum Ende des Jahres 2018 hin zu sehen. Der aktuelle Kupferpreis (Anfang 2019) beträgt ca. 6.000 \$/t.

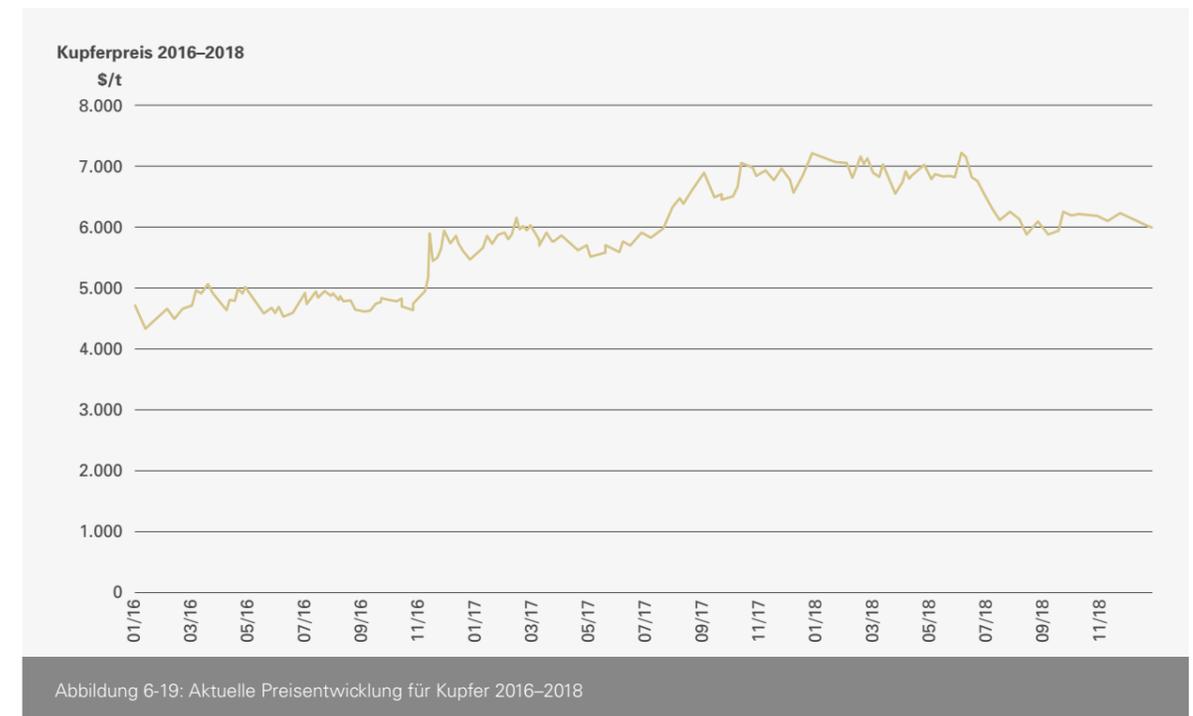


Abbildung 6-19: Aktuelle Preisentwicklung für Kupfer 2016–2018

© London Metal Exchange 2018

6.6.3 Beiträge zu den Kosten

Die Produktion von Kupfer ist im Vergleich zu den anderen betrachteten Rohstoffen (allen voran Seltenerdmetalle und Kobalt) global deutlich breiter verteilt (siehe Produktionszahlen in Kapitel 5). Des Weiteren muss zwischen Primär- und Sekundärproduktion (Recycling) unterschieden werden (Abschnitt 4.6.1).

In Korus (Korus 2018) wurden die Betriebskosten (Cash Cost) verschiedener Kupferminen analysiert. Die Kostenanteile für Löhne, Energie, Chemikalien sowie für die Raffinationsprozesse schwanken zwischen den betrachteten Minen sehr stark. Beispielsweise können die Chemikalienkosten einen Anteil zwischen weniger als 10 % und mehr als 50 % der Gesamtbetriebskosten ausmachen. Lohnkosten hingegen haben im Mittel einen Anteil von etwa 10–30 %. Die Kosten für Transport und Raffination werden mit etwa 10–50 % der Gesamtkosten beziffert.

Eine Analyse der Produktionskosten von SNL Metals&Mining (E & MJ 2015), heruntergebrochen auf die einzelnen Produk-

tionsprozesse, zeigt, dass die Kosten zur Förderung der Erze (Minenkosten) bereits etwa 60–80 % der Gesamtproduktionskosten betragen. Die Verhüttung und Raffination der Erze zu reinem Kupfer machen 5–25 % der Gesamtkosten aus, während der Transport bis zu 5 % der Gesamtproduktionskosten beträgt. Je nach Abbauort sind zudem Lizenzgebühren zu veranschlagen, die in Einzelfällen bis zu 15 % der Kosten ausmachen.

6.6.4 Betrachtung von Angebot und Nachfrage

In einem Bericht über den weltweiten Kupfermarkt der DBS Bank aus dem Jahr 2018 wird die voraussichtliche Preisentwicklung bis 2022 analysiert (Lee und Shin 2018). Während die Nachfrage durch die Elektromobilität im Jahr 2017 noch lediglich 0,9 % des weltweiten Kupfermarktes ausmachte, erhöht sich diese kontinuierlich bis ins Jahr 2030, in dem sie dann voraussichtlich ca. 8,2 % des gesamten Kupfermarktes von 2017 betragen wird, so der Bericht.

Entscheidend für einen möglichen Preisdruck ist die Frage, ob die Angebotsseite dem steigenden Bedarf folgen kann. Laut

DBS könnte es durchaus sein, dass dies nicht der Fall sein wird, und zwar aufgrund unterschiedlicher Faktoren. Zum einen sei zu erwarten, dass die Produktion bestehender Minen sinken wird, vor allem die von porphyrischen Lagerstätten, die einen Großteil der weltweiten Gewinnung darstellen (vgl. Abschnitt 4.6.1). Zum anderen habe Chinas jüngste Beschränkung der Importe von Altkupfer signifikante Auswirkungen auf den Weltmarkt. Die somit wegfallende Produktion von Sekundärkupfer kann laut der Analyse nicht durch erhöhte Primärproduktion ersetzt werden. DBS erwartet aufgrund der Beschränkungen das Wegfallen von 500.000 t Kupferangebot auf dem Weltmarkt, was 2,2 % der Weltproduktion von 2017 entspricht. Als Folge dieser beiden Faktoren wird ein lediglich geringes Wachstum der weltweiten Produktion um 3 % bis 2022 erwartet.

Als Konsequenz des verzögerten Angebotswachstums erwartet DBS einen Trend hin zu höheren Kupferpreisen bis 2022, der außerdem von kurzzeitigen Fluktuationen gekennzeichnet sein könnte. Während der Durchschnittspreis der LME 2017 noch rund 6.150 \$/t betrug, sagt DBS für 2022 einen Preis von ungefähr 6.800 \$/t voraus (Lee und Shin 2018).

6.7 Fazit

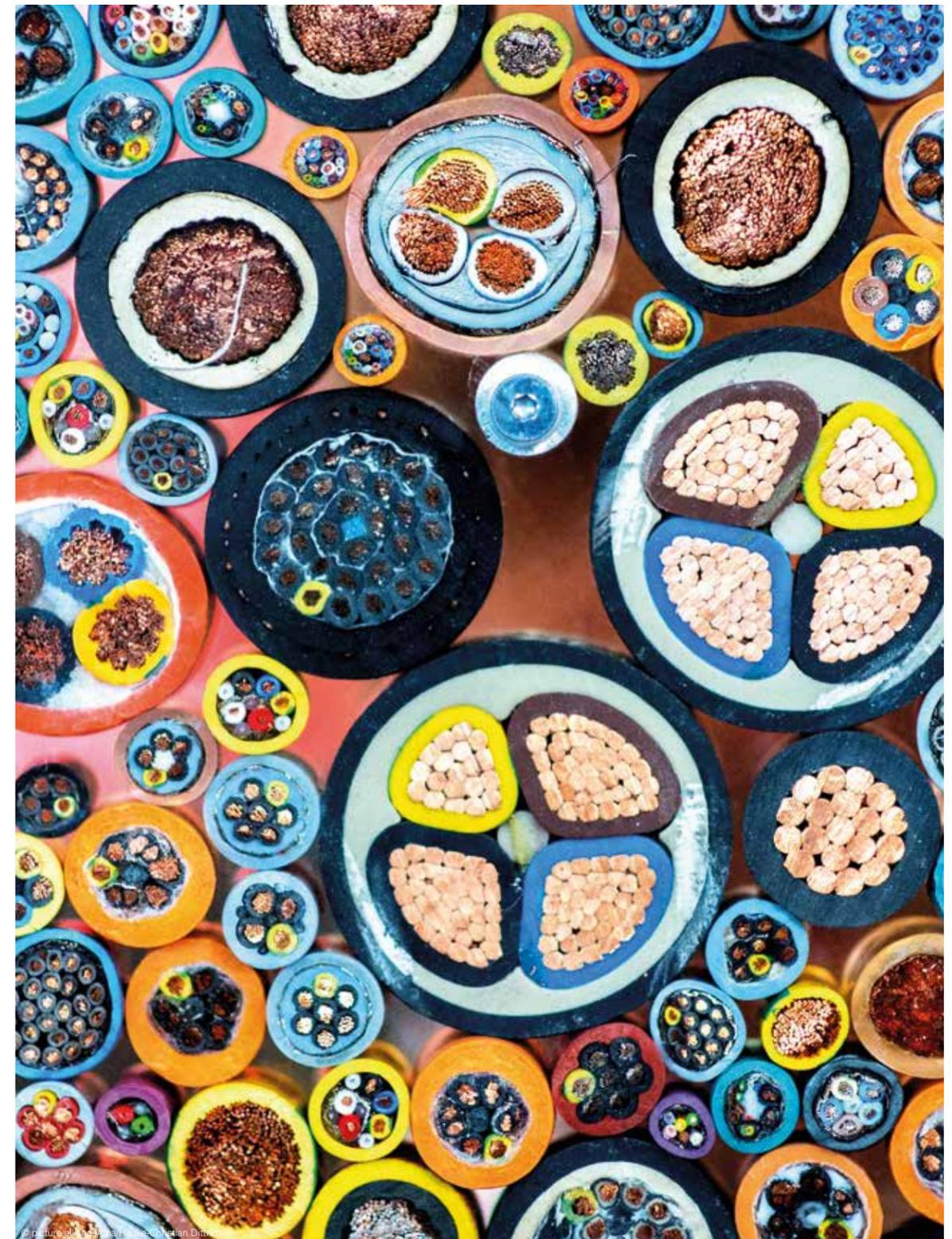
Grundsätzlich sind Angebot und Nachfrage von Rohstoffen auf dem Weltmarkt über den Preis miteinander gekoppelt. Steigt die Nachfrage nach einem Rohstoff, beispielsweise durch erhöhten Bedarf für neue Industriebereiche wie die Elektromobilität, ist bei gleichem Angebot mit einem Anstieg des Preises zu rechnen. Der höhere Preis führt einerseits zu mehr Profitabilität bestehender Produktionsstätten, andererseits ermöglicht er die Erschließung neuer, vorher unprofitabler Ressourcen. Auf diese Art und Weise folgt der gestiegenen Nachfrage mit einem gewissen Zeitversatz auch ein höheres Angebot, das wiederum vermindert auf den Preis wirkt.

Steigt jedoch die Nachfrage nach einem Rohstoff in kurzer Zeit sehr stark an, kann dies zur Folge haben, dass die Erhöhung des Angebots nicht schnell genug folgen kann. In diesem Fall kann es zu extremen Preissteigerungen kommen. In diesem Kapitel wurden die sechs für Batterie- und für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge als kritisch identifizierten Rohstoffe auf ihren historischen und zukünftigen Preisverlauf hin untersucht. Bei der Betrachtung der historischen und/oder der jüngeren Preisentwicklung zeigen alle Rohstoffe eine sehr volatile Preisentwicklung. Des Weiteren wurde auf Basis

von Literatureinschätzungen analysiert, inwiefern die erhöhte Nachfrage nach diesen Rohstoffen zu Verknappungen und Preissteigerungen führen könnte, die sich wiederum negativ auf die Entwicklung der Elektromobilität auswirken könnten.

Für Lithium erscheint die Nachfragesituation verhältnismäßig unproblematisch. Der steigende Bedarf kann laut mehreren Untersuchungen in den kommenden Jahren gedeckt werden, ohne dass signifikante Preissteigerungen erwartet werden müssen. Sowohl für Kobalt als auch für Nickel gestaltet sich der Ausblick durchaus problematischer. Für beide Rohstoffe wird eine Erhöhung der Nachfrage erwartet, die nur bedingt von neuen Produktionskapazitäten gedeckt werden kann, was entsprechende Preissteigerungen für beide Rohstoffe zur Folge haben könnte. Auch für Kupfer muss in den kommenden Jahren durchaus mit Preissteigerungen gerechnet werden. Diese sind nicht nur auf die Elektromobilität zurückzuführen, sondern insbesondere auf andere Anwendungen im Zeitalter der Elektrifizierung vieler Lebensbereiche. Die zukünftige Entwicklung von Angebot, Nachfrage sowie Preis von Platin ist von sehr verschiedenen Faktoren abhängig. So geht von der Nutzung von dieselbetriebenen Fahrzeugen und von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen ebenso wie von der Entwicklung des Recyclings sowie den politischen und wirtschaftlichen Entwicklungen in Südafrika ein erheblicher Einfluss aus. Auch die Angebotsituation von Seltenerdmetallen hängt sehr stark von der Situation in China ab.

In diesem Kapitel wurden Preisentwicklungen der als kritisch identifizierten Rohstoffe unabhängig von der tatsächlich verwendeten Menge in Fahrzeugen dargestellt. Betrachtungen auf Fahrzeugebene finden in Kapitel 10 statt.





07

**Ökologische Betrachtung der
Rohstoffbereitstellung**

07

Ökologische Betrachtung der Rohstoffbereitstellung



In diesem Kapitel wird die Bereitstellung der als kritisch identifizierten Rohstoffe hinsichtlich ökologischer Aspekte näher betrachtet. Hierfür werden zwei ökologische Parameter untersucht: der Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen, die mit der Rohstoffbereitstellung verbunden sind.

Die Betrachtungen in diesem Kapitel werden per Kilogramm des untersuchten Rohstoffes durchgeführt. Dabei muss stets beachtet werden, dass pro Fahrzeug sehr unterschiedliche Mengen der verschiedenen Rohstoffe benötigt werden. Eine Betrachtung der ökologischen Größen auf Fahrzeugebene findet in Kapitel 10 statt.

7.1 Kurze Einführung zu den betrachteten Größen

Der Primärenergiebedarf (PED) erfasst, ähnlich wie auch der kumulierte Energieaufwand (KEA), alle Aufwände, die im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes oder einer Dienstleistung stehen, anhand der ihnen zugrunde liegenden verbrauchten Primärenergie. Die Größe eignet sich daher, um den energetischen Aufwand für ein Produkt oder eine Dienstleistung zu beziffern, wobei auch die Aufwände von verwendeten Vorprodukten und Hilfsmaterialien berücksichtigt werden und sich somit ein ganzheitliches Bild ergibt. Beim PED kann zwischen erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Ressourcen unterschieden werden, um den Verbrauch von fossilen Energieträgern separat ausweisen zu können. Im Rahmen dieser Studie wurde der PED aus erneuerbaren und nichterneuerbaren Ressourcen ausgewertet. Die Energiewerte beziehen sich immer auf den Heizwert (früher:

unterer Heizwert) der entsprechenden Energieträger. Außerdem erfolgt eine Betrachtung der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen), die durch die Rohstoffbereitstellung verursacht werden. Hierbei werden unterschiedliche Treibhausgase (THG) wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und zahlreiche weitere Substanzen entsprechend ihrer Wirksamkeit¹³ gewichtet, zu einer aggregierten Größe, dem sog. Treibhausgaspotenzial (engl.: Global Warming Potential, GWP), aufsummiert und in CO₂-Äquivalenten ausgedrückt. Auch hierbei werden nicht nur die Emissionen, die aus den direkten Prozessschritten der Rohstoffförderung und -aufbereitung hervorgehen, sondern auch die Emissionen, die aus der Bereitstellung von Vorprodukten und Hilfsmaterialien resultieren, berücksichtigt, so dass alle durch die Rohstoffbereitstellung verursachten THG-Emissionen erfasst werden.

Darauf aufbauend wird eine weitere Betrachtung der THG-Emissionen vorgenommen, nun allerdings von der Vorstellung ausgehend, dass für die Prozessschritte der Rohstoffbereitstellung nur Strom aus erneuerbaren Energien (EE-Strom) verwendet wird. Der so ermittelte (fiktive) Wert¹⁴ zeigt das mögliche Emissionsreduktionspotenzial auf, das für stromintensive Rohstoffbereitstellungspfade relativ hoch sein kann. Die Ergebnisse sollen zum einen die Rolle des Stroms bei der Bereitstellung der Rohstoffe widerspiegeln und zum anderen eine Indikation abgeben, wie sehr sich die THG-Emissionen reduzieren könnten, wenn die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien bei der Rohstoffbereitstellung signifikant ausgeweitet würde.¹⁵

Wichtig ist, dass die Betrachtungen den heutigen technologischen Stand und auch die heutige Situation der Lagerstätten repräsentieren. Durch fortschreitende technische Entwicklungen oder neue Prozesse im Abbau oder in der Aufbereitung der Rohstoffe können sich der Energiebedarf und die THG-Emissionen beispielsweise durch Effizienzgewinne verringern. Allerdings gibt es hierzu auch eine gegenläufige Entwicklung: Durch den voranschreitenden Abbau von besonders wirtschaftlichen Lagerstätten und die Erschließung von bislang weniger profitablen Lagerstätten (Abschnitt 5.1) ergibt sich in aller Regel eine zunehmend sinkende Durchschnittskonzentration für den Abbau eines Rohstoffs. Dies erhöht in aller Regel den zum Abbau notwendigen Aufwand (Energie, Hilfsstoffe etc.), woraus häufig auch höhere THG-Emissionen resultieren.

An dieser Stelle muss außerdem darauf hingewiesen werden, dass mit dem Primärenergiebedarf und den Treibhausgasemissionen nur zwei zentrale ökologische Größen ausgewer-

tet werden, es darüber hinaus aber noch viele weitere Aspekte gibt (vgl. auch Kapitel 9). So ist beispielsweise der mit der Rohstoffbereitstellung einhergehende Wasserverbrauch in manchen Regionen ein äußerst wichtiger ökologischer Aspekt. Auch die Feinstaubemissionen aus bergmännischen Aktivitäten sind ebenso wie die Emission von SO₂ bei der Bereitstellung von Metallen aus sulfidischen Erzen eine wichtige Umweltauswirkung. Wird das entstehende SO₂ nicht abgetrennt und beispielsweise durch die Produktion von Schwefelsäure gebunden, führt das in die Atmosphäre entlassene Gas über das Auftreten von saurem Regen zu Waldsterben, was sich häufig in den Nickelabbaugebieten nachdrücklich zeigt (Trueb 2005). Da Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge viele Metalle aus sulfidischen Erzen nutzen (z. B. Kupfer, Nickel, Kobalt), ist auch das sogenannte Versauerungspotenzial durch SO₂-Emissionen für die beiden Antriebstechnologien ein weiterer sehr relevanter Umweltaspekt.

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse des Primärenergiebedarfs sowie der Treibhausgasemissionen und deren Reduktionspotenziale für die Rohstoffe Lithium, Kobalt, Nickel, Platin, Seltenerdmetalle und Kupfer dargestellt. Die Bandbreiten in den Ergebnissen sind auf die unterschiedlichen Gewinnungsmöglichkeiten der Rohstoffe aus verschiedenen Erzen ebenso wie auf unterschiedliche Verfahren und Prozessketten zur Rohstoffbereitstellung zurückzuführen. Die Ergebnisse wurden auf Basis von Datensätzen der GaBi-Datenbanken berechnet, die größtenteils auf öffentlich zugänglichen Datenquellen beruhen (thinkstep AG 2018a).

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse wird an dieser Stelle auf die Problematik der Koppelproduktion und den Ansatz der Allokation eingegangen. Da viele Metalle in Erzen vergesellschaftet sind, werden diese als sogenannte Koppelprodukte abgebaut (z. B. Kupfer und Nickel, Kobalt und Nickel, Kobalt und Kupfer). Das heißt, dass die Aufwände zur Bereitstellung mehrerer Rohstoffprodukten dienen. Um diese Aufwände den einzelnen Koppelprodukten zuzuordnen, muss eine Allokation der entsprechenden Aufwände, wie z. B. der Primärenergiebedarfe oder der THG-Emissionen, vorgenommen werden. Dies wird im Rahmen der Ökobilanz (vgl. ISO 14044), sofern möglich, nach physikalischen Parametern wie beispielsweise dem Massenanteil der geförderten Rohstoffe vorgenommen. Handelt es sich hierbei allerdings um Produkte mit stark unterschiedlichem Marktwert (z. B. Kupfer und Platin), so führt diese Aufteilung der Lasten zu unplausiblen Ergebnissen und es wird in der Regel auf eine Allokation nach Marktwert zurückgegriffen. Die Verwendung unterschiedlicher

¹³ | Siehe: IPCC Assessment Report 5, mit Zeithorizont: 100 Jahre (IPCC 2014).

¹⁴ | Bei dieser Fragestellung wird nur der Strombedarf für den Rohstoffbereitstellungspfad als 100 % erneuerbar unterstellt; der Strombezug für Vorprodukte oder Hilfsstoffe wird als unverändert unterstellt.

¹⁵ | Für diese Betrachtung wurde Strombezug aus Windkraft unterstellt.

Allokationsschlüssel kann daher zu unterschiedlichen Zuordnungen der Gesamtlasten zu den einzelnen Rohstoffen führen.

7.2 Lithium

Zunächst werden die Bandbreiten der Ergebnisse des Primärenergiebedarfs sowie der THG-Emissionen basierend auf Datensätzen der GaBi-Datenbanken (thinkstep AG 2018a) betrachtet, die mit der Bereitstellung von 1 kg Lithiumcarbonat einhergehen (Abbildung 7-1). Wie zu erwarten, sind der Primärenergiebedarf und die THG-Emissionen infolge der Bereitstellung von Lithiumcarbonat (Li_2CO_3) im Vergleich zu den im Folgenden betrachteten übrigen Rohstoffen relativ gering. Auch die Bandbreite der Ergebnisse ist relativ gering. Ein Großteil der THG-Emissionen bei der Bereitstellung von Lithium wird von Chemikalien verursacht, die für den Aufbereitungsprozess verwendet werden. Daher scheint es einleuchtend, dass die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen wenig Einfluss auf die THG-Emissionen hat (Reduktion < 10 %), da von der Stromnutzung kein signifikanter Beitrag zu den THG-Emissionen ausgeht.

7.3 Kobalt

Mit Hilfe von bereits existierenden Datensätzen der GaBi-Datenbanken (thinkstep AG 2018a) wurden die Bandbreiten der Ergebnisse für den Primärenergiebedarf und die THG-Emissionen infolge der Bereitstellung von 1 kg Kobalt berechnet und dargestellt (Abbildung 7-2). Die großen Bandbreiten in den Ergebnissen sind auf die unterschiedlichen Gewinnungsmöglichkeiten des Rohstoffs aus verschiedenen Erzen ebenso wie auf unterschiedliche Verfahren und Prozessketten zur Materialbereitstellung zurückzuführen. Verglichen mit Lithium erfordert die Bereitstellung von Kobalt deutlich höhere Mengen an Primärenergie und verursacht höhere THG-Emissionen, was größtenteils auf die stromintensive Gewinnung und Aufbereitung sowie die ebenfalls stromintensiven Verhüttungs- und Raffinationsprozesse zurückzuführen ist. Die Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien könnte hier zu deutlichen Reduktionen der THG-Emissionen im Bereich von ca. 30 bis 60 % führen.

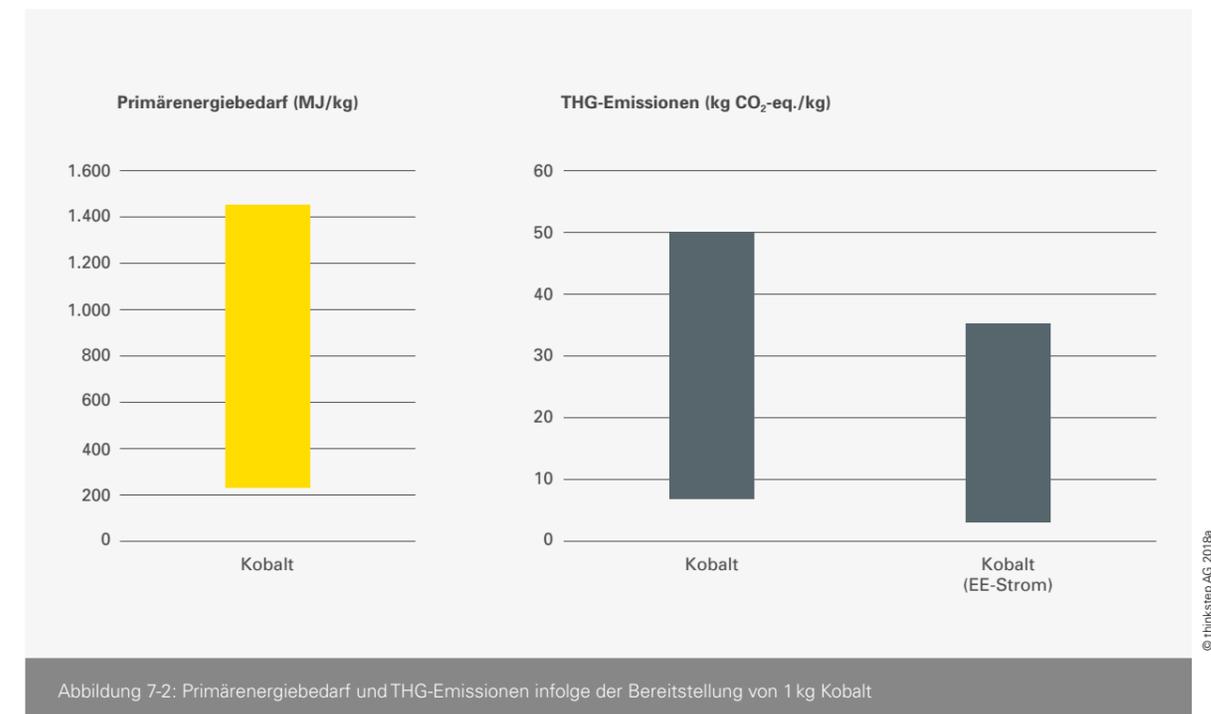
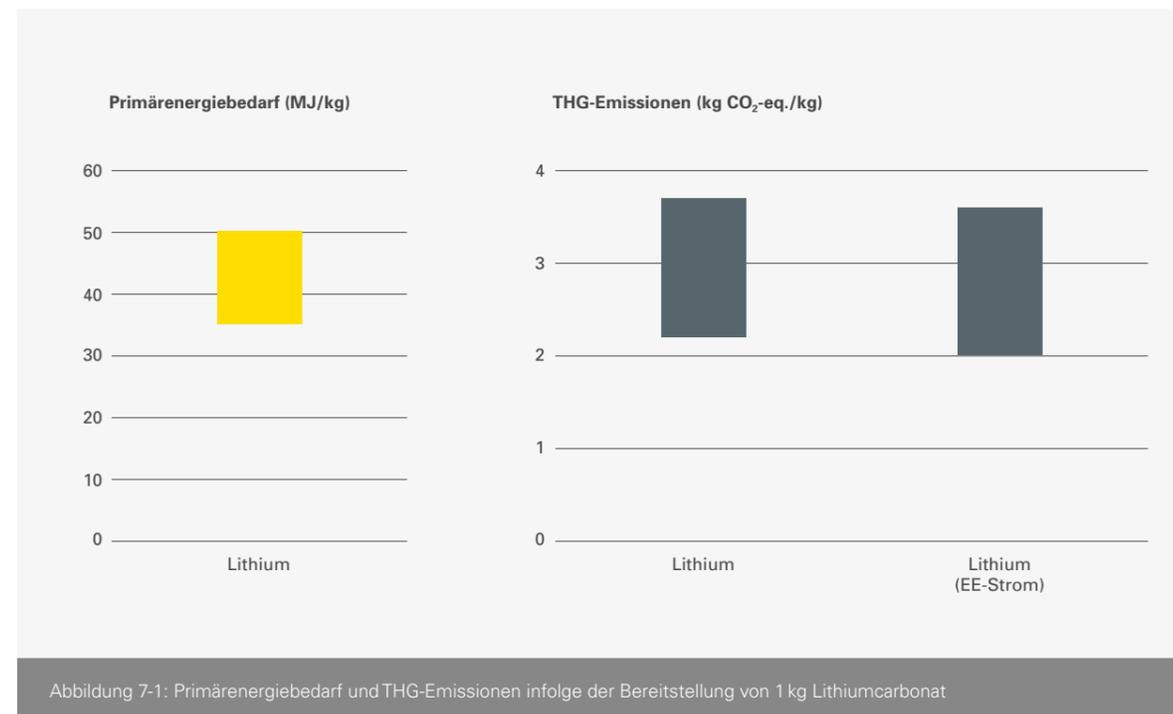
Das Cobalt Institute (CI) hat eine ökologische Analyse zur Bereitstellung von raffiniertem Kobalt durchgeführt und als aggregierten Lebenszyklusinventar-Datensatz zur Verfügung gestellt.¹⁶ Der Datensatz spiegelt den globalen Durchschnitt der Gewinnung und Verarbeitung von metallischem Kobalt für das Jahr 2012 wider, auf Basis einer spezifischen Primärdatensammlung zum Bergbau in Kanada, Kuba, der DR Kongo und Neukaledonien sowie zur Verarbeitung in Belgien, Kanada, Finnland, Japan, Norwegen, den Philippinen und Sambia. Die Auswertung des Datensatzes des Cobalt Institute (CI) ergibt einen Primärenergiebedarf von 1.378 MJ/kg Kobalt sowie THG-Emissionen von 38,1 kg $\text{CO}_2\text{-eq./kg}$ Kobalt (Referenzjahr 2012). Die Werte befinden sich am oberen Ende der in Abbildung 7-2 angegebenen Bandbreiten.

ven Schritte der Primärextraktion (wie Schmelzen, Auslaugen oder Kalzinieren) und Raffination. Aufgrund des großen Beitrags dieser energieintensiven Prozessschritte zu den THG-Emissionen der Nickelbereitstellung könnte durch die Umstellung auf Strom aus erneuerbaren Energien eine beachtliche Reduktion der THG-Emissionen um 30 % bis 65 % erreicht werden (thinkstep AG 2018a).

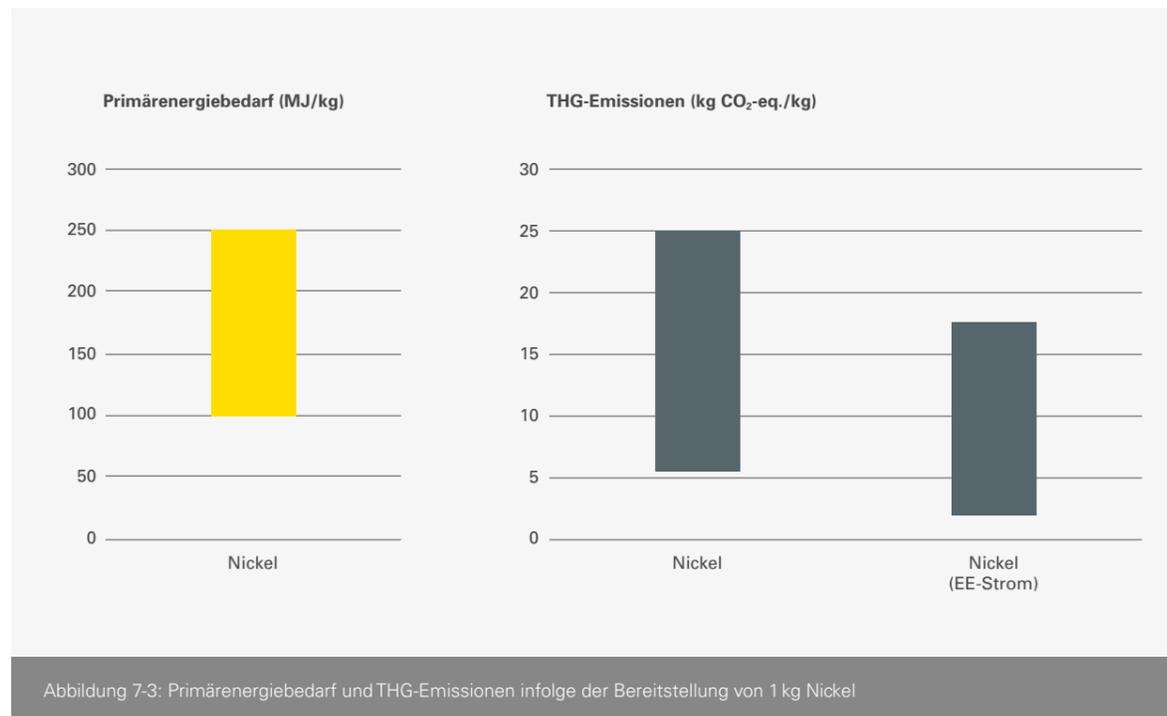
Das Nickel Institute hat im Jahr 2012 die Firma thinkstep AG (früher: PE International AG) damit beauftragt, eine Studie zur ökologischen Analyse der Nickelbereitstellung durchzuführen (Nickel Institute 2012). Dazu wurden spezifische Primärdaten von 19 Produktionsstätten in Australien, Brasilien, Kanada, Kolumbien, der Dominikanischen Republik, Finnland, Frankreich, Japan, Neukaledonien, Norwegen, Russland, Venezuela und Großbritannien analysiert, die mit einem Anteil von 56 % zu der weltweiten Nickelproduktion für das Jahr 2011 beigetragen haben. Die Studie gibt für die durchschnittliche Nickelbereitstellung durch Primärproduktion einen Primärenergiebedarf von 149 MJ/kg Class-I-Nickel sowie THG-Emissionen von 7,87 kg $\text{CO}_2\text{-eq./kg}$ Class-I-Nickel an (Referenzjahr 2011). Die Werte liegen im unteren Bereich der in Abbildung 7-3 angegebenen Bandbreiten.

7.4 Nickel

Abbildung 7-3 zeigt die Bandbreiten der Ergebnisse für den Primärenergiebedarf und die THG-Emissionen infolge der Bereitstellung von 1 kg Nickel, basierend auf Datensätzen der GaBi-Datenbanken (thinkstep AG 2018a). Hauptverursacher für den Primärenergiebedarf und die THG-Emissionen sind neben der Gewinnung und Aufbereitung die energieintensi-



¹⁶ Der Datensatz kann online angefragt werden (Cobalt Institute 2018) und steht in den GaBi-Datenbanken der thinkstep AG (thinkstep AG 2018a) zur Verfügung.



© thinkstep AG 2018a

lung von PGM und Gold einen Primärenergiebedarf von 177.170 MJ/kg PGM¹⁸ sowie THG-Emissionen von 42.122 kg CO₂-eq./kg PGM¹⁹ an. Die Werte befinden sich im unteren Bereich der in Abbildung 7-4 angegebenen Bandbreiten. Das Unternehmen kommt außerdem zu der Einschätzung, dass über 90 % der THG-Emissionen dem Stromverbrauch zugeordnet werden können (Anglo American 2012).

7.6 Seltenerdmetalle

Für die SEE wird eine Mischung aus Neodym und Dysprosium betrachtet, wie sie zur Herstellung von Permanentmagneten eingesetzt wird (vgl. Abschnitt 3.2). Da in den zur SEE-Förderung verwendeten Erzen aufgrund ihrer chemischen Ähnlichkeit immer unterschiedliche Seltenerdmetalle vergesellschaftet vorkommen (Abschnitt 4.5.1) und sich diese hinsichtlich ihres Marktwertes teils erheblich unterscheiden (Abschnitt 6.5.2), werden die gemeinsamen Aufwände in aller Regel über Allokation nach Marktwert auf die einzelnen Metalle verteilt. Wie in Abbildung 7-5 dargestellt, sind der Primärenergiebedarf und die THG-Emissionen infolge der Bereitstellung der Neodym-Dysprosium-Mischung, basierend

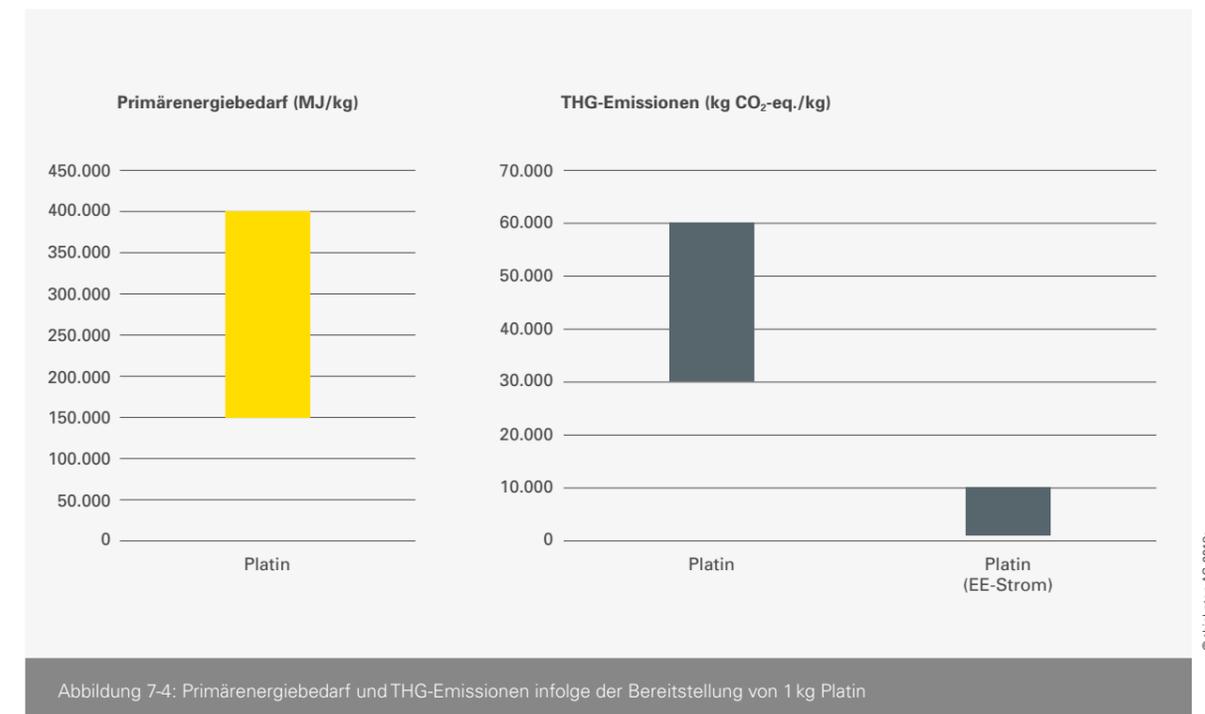
auf Datensätzen der GaBi-Datenbanken (thinkstep AG 2018a), relativ hoch. Dies liegt neben der Gewinnung und Aufbereitung zu einem großen Teil an der sehr energieintensiven Schmelzflusselektrolyse, die erforderlich ist, um die Seltenerdmetalle in Reinform zu erhalten. Ein Großteil der SEM-Bereitstellung findet in China statt, das einen hohen Anteil an Kohlekraftwerken im nationalen Strommix (thinkstep AG 2018a) besitzt und somit hohe THG-Emissionen aufweist. Aufgrund des großen Anteils der stromintensiven Prozessschritte an den THG-Emissionen könnte durch die Umstellung auf Strom aus erneuerbaren Energien eine beachtliche Reduktion der THG-Emissionen um bis zu ca. 70 % erreicht werden (thinkstep AG 2018a).

7.5 Platin

Mit Hilfe von existierenden Datensätzen der GaBi-Datenbanken (thinkstep AG 2018a) wurden die Bandbreiten der Ergebnisse für den Primärenergiebedarf und die THG-Emissionen infolge der Bereitstellung von 1 kg Platin berechnet und dargestellt (Abbildung 7-4). Die Ergebnisse der beiden Größen liegen für die Platinbereitstellung einige Größenordnungen über den Ergebnissen der zuvor betrachteten Rohstoffe. Der Primärenergiebedarf korreliert dabei mit der deutlich geringeren Rohstoffkonzentration im Erz: Der Gehalt von PGM liegt je nach Erz in der Größenordnung weniger Gramm pro Tonne, wohingegen beispielsweise die Kupferkonzentration in entsprechenden Erzen im niedrigen Prozentbereich und somit vier Größenordnungen darüber liegt (Schmidt 2015; Trueb 2005). PGM werden sowohl im Tagebau als auch unter Tage abgebaut (vgl. Abschnitt 4.5.1), was besonders für Letzteres zu hohen Energiebedarfen führt, da unter Tage sehr hohe Temperaturen vorherrschen (Trueb 2005), die einen entsprechendem Klimatisierungsbedarf erforderlich machen. Ein Großteil des Platins wird in Südafrika abgebaut, einem Land mit einem relativ hohen Anteil an Kohlekraftwerken im natio-

nalen Strommix (thinkstep AG 2018a). Dies führt aufgrund der stromintensiven Prozesse während der Materialbereitstellung zu hohen THG-Emissionen. Daher ergeben sich durch die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen sehr hohe THG-Emissionsreduktionspotenziale von bis zu 90 % (thinkstep AG 2018a).

Die Ergebnisse einer von der International Platinum Group Metals Association (IPA) durchgeführten Studie über die Umweltauswirkungen der Primärproduktion von PGM zeigen, dass der Stromverbrauch während des Bergbaus und der Erzaufbereitung sowie die mit diesen beiden Prozessschritten verbundenen THG-Emissionen für einen signifikanten Anteil von 72 % an den gesamten THG-Emissionen infolge der Bereitstellung von PGM verantwortlich sind (IPA 2017). Ein von dem Verband erstellter Lebenszyklusinventar-Datensatz kann auf der Homepage der International Platinum Group Metals Association (IPA) angefragt werden.¹⁷ Die Ergebnisse basieren auf den Primärdaten der Mitgliedsunternehmen und berücksichtigen die Primärproduktion des Rohstoffs wie auch Recycling. In seinem Nachhaltigkeitsbericht gibt das Unternehmen Anglo American Platinum Limited für die Bereitstel-



© thinkstep AG 2018a

17 | Der Datensatz kann online von Firmen für Studien angefragt werden (IPA 2018).

18 | Ein Primärenergiebedarf von 177.170 MJ/kg PGM und Gold entspricht 5,51 GJ/Feinunze PGM und Gold (1 Feinunze = 0,0311 kg).

19 | THG-Emissionen von 42.122 kg CO₂-eq./kg PGM und Gold entsprechen 1,31 t CO₂-eq./Unze PGM und Gold (1 Feinunze = 0,0311 kg).



Abbildung 7-5: Primärenergiebedarf und THG-Emissionen infolge der Bereitstellung von 1 kg SEE (für Magnet-Mischung)

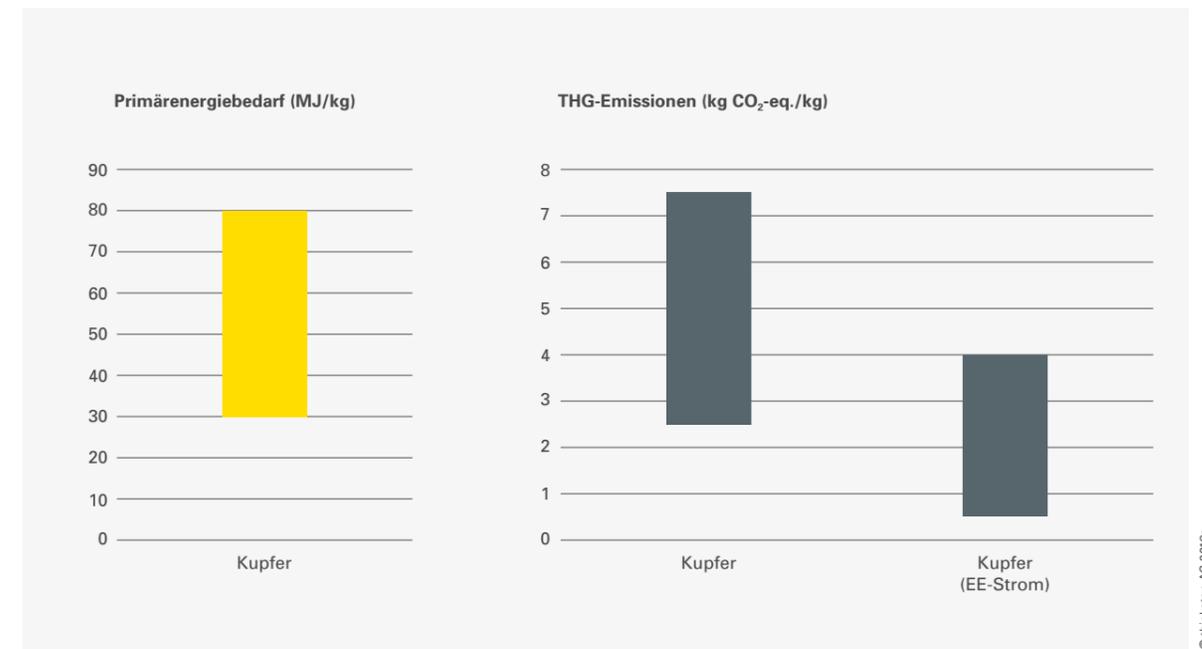


Abbildung 7-6: Primärenergiebedarf und THG-Emissionen infolge der Bereitstellung von 1 kg Kupfer

7.7 Kupfer

In Abbildung 7-6 sind der Primärenergiebedarf und die THG-Emissionen infolge der Bereitstellung von 1 kg Kupfer basierend auf Datensätzen der GaBi-Datenbanken (thinkstep AG 2018a) dargestellt. Der Primärenergiebedarf für die Bereitstellung von Kupfer liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie der für die Bereitstellung von Lithium und verursacht relativ geringe THG-Emissionen.

Die Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien könnte in der Kupferbereitstellung zu deutlichen Reduktionen der THG-Emissionen im Bereich von 50 bis 80 % führen, was größtenteils auf die stromintensive Gewinnung und Aufbereitung sowie die ebenfalls stromintensiven Verhüttungs- und Raffinationsprozesse zurückzuführen ist.

Die International Copper Association (ICA) hat eine Studie zum Umweltprofil der Kupferbereitstellung durchgeführt (International Copper Association 2018). Von den Mitgliedsunternehmen wurden spezifische Primärdaten für die Kupferproduktion von vier Kontinenten für das Referenzjahr 2013

bereitgestellt und mit Hilfe der GaBi-Datenbanken modelliert. Dabei wurden alle Verfahrensrouten der Kupferbereitstellung inklusive der sekundären Kupferkathodenproduktion berücksichtigt. Die Daten repräsentierten 21 % der jährlichen Weltproduktion von Kupferkathoden und kommen im Ergebnis auf einen Primärenergiebedarf von 47 MJ/kg Kupferkathode und auf THG-Emissionen²⁰ von 4,1 kg CO₂-eq./kg Kupferkathode (Referenzjahr: 2013), womit die Ergebnisse innerhalb der Ergebnisbandbreiten der Datensätze der GaBi-Datenbanken (thinkstep AG 2018a) liegen. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass das Umweltprofil der Kupferbereitstellung maßgeblich durch den verwendeten Strommix bestimmt wird. Darüber hinaus ist auch die Dieselverbrennung während des Bergbaus von Bedeutung.

20 | Betrachtete Wirkungskategorie: IPCC 2001 Global Warming Potential (GWP100).

7.8 Fazit

Die ökologischen Auswirkungen des Bergbaus und der Aufbereitung sind äußerst wichtige Aspekte im Zusammenhang mit der Rohstoffbereitstellung. In diesem Kapitel wurden der Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen betrachtet, die aus der Bereitstellung der für Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge in Kapitel 3 als kritisch identifizierten Rohstoffe resultieren. Die Ergebnisse sind sehr unterschiedlich und variieren von Rohstoff zu Rohstoff. Während Lithium und Kupfer relativ geringe und Nickel sowie Kobalt höhere ökologische Lasten mit sich bringen, weisen die SEE für Permanentmagneten und insbesondere die Bereitstellung von Platin hohe Lasten pro kg auf.

In den meisten Fällen haben energieintensive Prozessschritte in der Bereitstellungskette den größten Einfluss auf die Ergebnisse. Daher ergeben sich für die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien bei der Bereitstellung von Kobalt, Nickel, Kupfer, Platin und den Seltenerdmetallen große Reduktionspotenziale für die THG-Emissionen. Eine Ausnahme bildet die Bereitstellung von Lithium. Hier wird der Großteil

der THG-Emissionen von Chemikalien verursacht, die für den Aufbereitungsprozess verwendet werden. Dementsprechend gering sind auch die Reduktionspotenziale durch den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien bei der Lithiumbereitstellung.

In diesem Kapitel wurden die als kritisch identifizierten Rohstoffe auf ausgewählte ökologische Auswirkungen hin untersucht. Dabei wurden die Rohstoffe auf Kilogrammebene miteinander verglichen. Im Fahrzeug werden jedoch sehr unterschiedliche Mengen der einzelnen Rohstoffe benötigt, daher finden weiterführende Betrachtungen auf Fahrzeugebene in Kapitel 10 statt.



08

Recycling

08

Recycling



Die mögliche Wiedergewinnung nach einer erfolgten Verwendung in einem Produkt mittels Recycling stellt einen zentralen Aspekt der Rohstoffnutzung mit vielseitigen technischen, wirtschaftlichen, versorgungspolitischen und ökologischen Vorteilen dar. Zwar sind grundsätzlich sehr viele Materialien, wie beispielsweise auch Kunststoffe, recyclingfähig, allerdings wird heutzutage insbesondere das stoffliche Recycling von Metallen besonders effizient und umfassend betrieben. Somit stellt das Recycling der für Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge in Kapitel 3 für die Anwendung als kritisch identifizierten Rohstoffe einen äußerst relevanten Komplex dar, der in diesem Kapitel eingehend beleuchtet wird.

Zunächst wird die Erwartung hinsichtlich des Rohstoffrecyclings auf Basis der in den Experteninterviews erhaltenen Antworten analysiert (Abschnitt 8.1). Anschließend werden die heute erreichbaren Recyclingquoten für die als kritisch identifizierten Rohstoffe näher betrachtet (Abschnitt 8.2). Nach dem Hinterfragen, was „optimales Recycling“ bedeutet (Abschnitt 8.3), werden unterschiedliche Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien und ihre technischen, ökologischen und ökonomischen Charakteristika (Abschnitt 8.4) ebenso wie das Recycling von Brennstoffzellen (Abschnitt 8.5) erläutert. Zuletzt wird auch das Recycling von Seltenerdmetallen aus Permanentmagneten und von Kupfer behandelt (Abschnitt 8.6 bzw. 8.7).

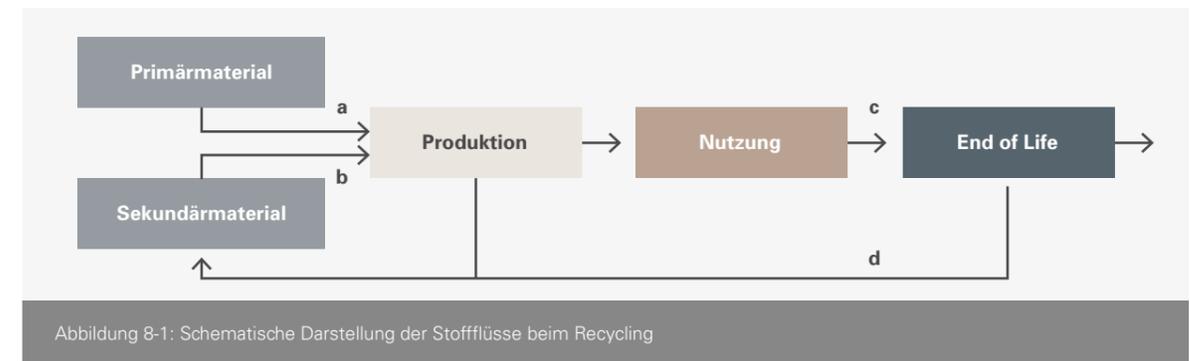
8.1 Erwartung hinsichtlich des Recyclings (Experteninterviews)

Im Rahmen der Experteninterviews wurde u. a. die Frage gestellt, welche zukünftige Rolle für das Recycling der individuellen Rohstoffe erwartet wird. Während die Antworten für manche Materialien stark divergieren, sind sie für die als kritisch identifizierten Rohstoffe doch sehr einheitlich, da nach der

Mehrheit der Antworten zukünftig eine wichtige Rolle des Recyclings von Lithium, Nickel und Kobalt aus Batterien, Platin aus Brennstoffzellen sowie von SEE und Kupfer erwartet wird. Für Kobalt und Platin waren sich sogar alle Befragten darüber einig, dass das Recycling eine sehr wichtige Rolle einnehmen wird, wohingegen für Lithium 40 % der Befragten mit einer mittleren oder sogar weniger wichtigen Rolle rechnen. Für Eisen, Phosphor, Titan, natürliches und synthetisches Graphit sowie für Epoxidharz wird überwiegend eine weniger wichtige Rolle des Recyclings erwartet. Hierbei gehen allerdings die Einschätzungen zu den drei erstgenannten relativ weit auseinander. Auch für das Recycling von Mangan, Aluminium und Carbonfasern ergeben sich stark divergierende Einschätzungen aus den Antworten. Die unterschiedlichen Einschätzungen dürften sehr wahrscheinlich darauf zurückzuführen sein, dass auf der einen Seite die Wiedergewinnung dieser Materialien angesichts von hohen Energieeinsätzen bei der Gewinnung, dissipativen Verlusten des Rohstoffs (z. B. Phosphor) oder auch strategischer Bedeutung auf der einen Seite wünschenswert sind, jedoch auf der anderen Seite zum Beispiel durch die aktuelle Kostensituation nicht unbedingt mit deutlich höheren Recyclinganstrengungen in Zukunft gerechnet werden kann. Außerdem sei erwähnt, dass, je nach Recyclingverfahren, unter Umständen nicht alle Materialien gleichermaßen zurückgewonnen werden können.

8.2 Betrachtung heutiger Recyclingquoten

Um eine generelle Einschätzung der heutigen Recyclingsituation zu geben, werden im Folgenden die für die als kritisch identifizierten Rohstoffe gegebenen Recyclingquoten näher erläutert. Hierbei sind zwei wichtige Größen voneinander zu unterscheiden (Abbildung 8-1):



1. Der Recycled Content ($RC = \frac{b}{a+b}$) bezeichnet den Anteil von wiedergewonnenem Material an der Gesamtmaterialmenge, die in der Herstellung von Produkten eingesetzt wird. Das wiedergewonnene Material stammt dabei sowohl aus der Entsorgung von genutzten Produkten als auch aus Produktionsabfällen.
2. Die End-of-Life Recycling Rate ($EoL-RR = \frac{c}{d}$) gibt an, welcher Anteil eines Werkstoffs nach dem End of Life aus den Produkten wiedergewonnen wird und der Bereitstellung von Sekundärmaterial zur Verfügung gestellt werden kann.

Beide Größen können für verschiedene Materialien höchst unterschiedlich ausgeprägt sein angesichts der Anwendungen, in denen sie eingesetzt werden, der sich ergebenden Kosten für das Einsammeln der Rohstoffe am Produktlebensende, der in verschiedenen Ländern unterschiedlich etablierten Sammel- und Recyclingverfahren und natürlich der allgemeinen aktuell vorherrschenden Kostensituation zur Bereitstellung von Primär- und Sekundärmaterial.

Tabelle 8-1 zeigt Werte für die beiden genannten Größen aus globaler Perspektive für die in Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen als kritisch identifizierten Rohstoffe. Lithium wird, unabhängig von seiner Verwendung als Reinmetall oder in einer Verbindung, in nur sehr geringem Maße wiedergewonnen. Dies wird daran deutlich, dass eingesetztes Lithium fast vollständig aus Primärproduktion stammt, und auch daran, dass nach dem Lebensende des Einsatzproduktes kaum Lithium zur Sekundärmaterialproduktion wiedergewonnen wird. Für Kobalt zeigt sich hingegen, dass ca. ein Drittel des verwendeten Materials aus Recycling stammt und ca. zwei Drittel des Kobalts am Lebensende von Produkten rückgewonnen werden. Hierbei gilt es zu bedenken, dass gut ein Viertel des Kobaltbe-

darfs auf Superlegierungen und Hartmetalle entfällt (Abschnitt 4.2.2) und sich die Wiederverwendung von Kobalt für diesen Anwendungsbereich weniger schwierig gestaltet, da es nicht als Reinmetall wiedergewonnen werden muss und die beteiligten Akteure Unternehmen statt privater Endkunden sind. Hierbei ist zu beachten, dass die angezeigten Daten für Kobalt aus einem Bericht des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) stammen, der bereits 2011 veröffentlicht wurde (Graedel et al. 2011) und auf älteren Publikationen basiert. Insbesondere bei Kobalt hat seitdem jedoch eine bedeutende Marktdynamik stattgefunden, die sehr wahrscheinlich auch die Recyclingraten beeinflusst hat. So dürfte sich der steigende Kobalteinsatz in den Batterien von portablen Geräten (Abschnitt 4.2.2) in den letzten Jahren negativ auf die dargestellten Recyclingquoten ausgewirkt haben.

Die Differenz der beiden Werte, RC und EoL-RR, ergibt sich auch infolge der Dynamik des Materialbedarfs: Der steigende Kobaltgesamtbedarf könnte selbst durch eine gänzlich perfekte Materialwiedergewinnung nicht gedeckt werden, sondern es müsste selbst dann kontinuierlich neues Primärmaterial gefördert werden, um den ständig wachsenden Bedarf zu decken (Wurster 2018). Ein steigender Gesamtbedarf würde sich in dem in Abbildung 8-1 gezeigten Schema zunächst nur im Produktionsschritt zeigen (Flüsse a und b). Fluss b stellt wiedergewonnenes Sekundärmaterial dar. Dieses ist aber erst zeitverzögert verfügbar, nämlich nach der Nutzungsphase der Anwendungen. Daher müsste der zusätzliche Bedarf zunächst über Fluss a aus Primärmaterial gedeckt werden.

Auch für Nickel ergeben sich für beide Kenngrößen Werte in ähnlicher Größenordnung wie bei Kobalt und auch hier ist die Wiederverwendung für Metallverbindungen weniger schwierig, wenn das Reinmetall nicht wiedergewonnen werden

muss. Zur Wiedergewinnung von Platin und anderen wertvollen Edelmetallen werden große Anstrengungen unternommen. Hieraus ergibt sich ein Recycled Content von bis zu 50 %. Entsprechend liegt die EoL-RR deutlich höher, nämlich im Bereich von 70 %. Die Einschätzung zur Platinrückgewinnung aus Fahrzeugen wird allerdings mit 50–55 % etwas geringer beziffert (Graedel et al. 2011). Ein Grund dafür sind die geringeren Rückführungsraten von Fahrzeugen im Vergleich mit industriellen Anwendungen. Interessant ist auch, dass mindestens 35 % des Platinbedarfs für Fahrzeugkatalysatoren in den letzten Jahren durch Platin aus Recycling gedeckt werden konnten (Johnson Matthey 2018).

Für die Seltenerdelemente Neodym und Dysprosium, die in Permanentmagneten eingesetzt werden, sind sowohl der RC als auch die EoL-RR in einem relativ niedrigen Bereich. Das Recycling von Kupfer ist wiederum sehr etabliert, was dazu führt, dass ca. ein Drittel des eingesetzten Kupfers aus wiedergewonnenem Material stammt und ca. die Hälfte des am Lebensende von Produkten anfallenden Kupfers wiedergewonnen wird (Graedel et al. 2011).

Entscheidend für die Recyclingquoten der einzelnen Materialien ist zudem, in welchem Produktsegment sie sich wiederfinden. Wenn Produkte an Endkunden gehen, ist unter Umständen mit geringeren Recyclingquoten zu rechnen, als wenn

diese in der Hand von Unternehmen bleiben, bei denen systematische Recyclingkreisläufe etabliert sind.

8.3 Optimales Recycling

In aller Regel bietet die Materialrückgewinnung mittels Recycling die Möglichkeit, Rohstoffe mit teils erheblich geringerem Energieaufwand, mit geringeren Emissionen sowie ohne weitere Lasten zu gewinnen, die mit der Primärförderung der Rohstoffe verbunden sind. Dies ist exemplarisch in Abbildung 8-2 skizziert. Allerdings müssen in der häufig geführten Diskussion um die optimale Recyclingquote auch die Aufwände zur Sammlung der genutzten Produkte berücksichtigt werden. Diese steigen für höhere Sammelquoten i. d. R. überproportional an, was ebenso in Abbildung 8-2 schematisch dargestellt ist. Somit ergibt sich ein Minimum für eine bestimmte Recyclingquote, für die der Gesamtaufwand bzw. die Emissionen minimal werden. Bei welcher Recyclingquote dieses Minimum liegt, hängt nicht nur vom betrachteten Material und seinen Eigenschaften, dessen Primär- und Sekundärproduktion sowie von den dafür verwendeten Energieträgern ab, sondern ebenso von der Gestaltung und Effizienz des Sammelsystems und der darauffolgenden Recyclingprozesse. Hier sei auch auf die technischen Anforderungen der Recyclingprozesse hingewiesen. So können Prozesse zum Beispiel für spezielle Batterietypen konzipiert, oder aber flexi-

bler gehalten und damit für verschiedene Batterietypen geeignet sein. In der Regel erreicht das Recycling mit flexibleren Prozessen nicht die gleiche Effizienz wie ein spezialisiertes Verfahren. Andererseits kann es durch flexiblere Prozesse möglich sein, verschiedene Batterietypen und somit größere Mengen zu verwerten, wodurch die gesamten Aufwendungen geringer gehalten werden können und die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens erhöht werden kann.

Daraus ergeben sich häufig für verschiedene zu optimierende Zielgrößen, beispielsweise zur Minimierung des Energieaufwands, der Treibhausgasemissionen, der Kosten, der Emission von Feinstaub, säurebildenden oder toxischen Substanzen etc., unterschiedliche optimale Recyclingquoten. Zwar korrelieren Energie- und Treibhausgasemissionen in der Regel über einen konstanten Faktor, der durch den Kraftwerkspark zur Stromproduktion bestimmt wird, die weiteren Parameter können jedoch erheblich davon abweichen und somit zu einem Zielkonflikt hinsichtlich der optimalen Recyclingquote führen. Dies gilt es in der Diskussion um ideales Recycling ebenso zu berücksichtigen wie die nur schwer quantifizierbare politisch-strategische Relevanz von Recycling und der Minimierung der Abhängigkeit von Rohstoffimporten bzw. der Bewertung von dauerhaften Materialverlusten durch nicht erfolgtes Recycling.

8.4 Recycling der kritischen Rohstoffe aus Batterien

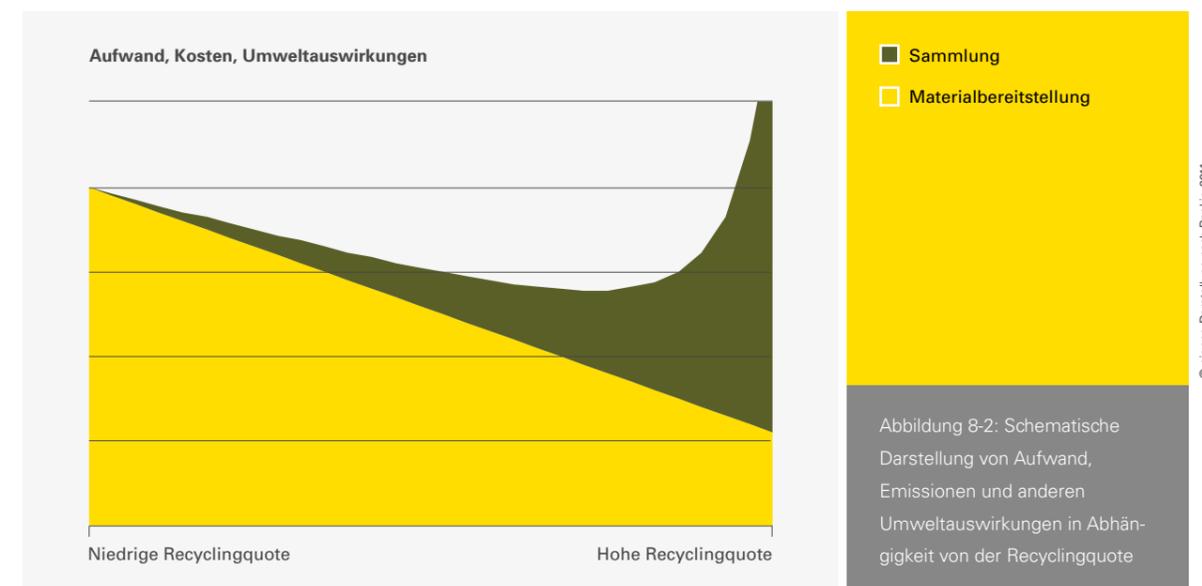
Das Recycling der Traktionsbatterien aus Elektrofahrzeugen ist ein sehr kontrovers diskutiertes Thema. Die in der öffentlichen Diskussion dargestellten extremen Positionen reichen von der Ansicht, Traktionsbatterien seien ein nur schwer zu entsorgender Sondermüll, bis hin zur Perspektive, dass alle relevanten Materialien einfach und in batterieauglicher Qualität wiedergewonnen und somit die Materialkreisläufe der relevanten Rohstoffe komplett geschlossen werden können. Der vorliegende Abschnitt befasst sich daher mit der aktuellen Gestaltung des Batterierecyclings und seinen zukünftigen Potenzialen.

Das Zurückführen von Fahrzeugen und ihren Komponenten ist innerhalb der Europäischen Union hauptsächlich durch die Direktive 2000/53/EG (novelliert durch Direktive 2018/849/EU) geregelt. Im Sinne der Direktive sind Automobilhersteller verantwortlich für das Zurückführen und das Recycling der von ihnen in Umlauf gebrachten Fahrzeuge. Als Zielvorgabe für die Verwertung und Wiederverwendung wurde dabei für den Zeitraum ab 2015 ein Wert von 95 % des durchschnittlichen Fahrzeuggewichtes festgesetzt (Europäisches Parlament 2000, 2018). Laut dem Jahresbericht über Altfahrzeuge von UBA und BMU liegt die Verwertungs- und Wiederverwendungsquote in Deutschland bei 98 % (2016) (UBA 2016).

	Recycled Content	EoL Recycling Rate
Lithium	< 1 %	< 1 %
Kobalt	32 %	68 %
Nickel	34 %, 41 %	57 %, 58–63 %, 68 %
Platin	16 %, 25 %, 50 %	76 %, 60–70 %, Fahrzeuge: 50–55 %
SEE (Nd, Dy)	1–10 %	< 1 %
Cu	22 %, 30 %, 37 %	43 %, 53 %

© Graedel et al. 2011; Johnson Matthey 2018; Nickel Institute 2016a

Tabelle 8-1: Darstellung globaler Werte (nach verschiedenen Quellen) für Recycled Content und EoL Recycling Rate für die als kritisch identifizierten Rohstoffe aus heutiger globaler Perspektive



© eigene Darstellung nach Rankin 2011

Im Zusammenhang mit der Verwertung von Altfahrzeugen sei zudem eine Problematik bezüglich des Verbleibs stillgelegter Altfahrzeuge in Deutschland erwähnt. Von 2,9 Mio. stillgelegten Fahrzeugen im Jahr 2016 wurde mehr als die Hälfte, nämlich ca. 1,6 Mio., ins EU-Ausland exportiert. 0,28 Mio. Fahrzeuge wurden ins Nicht-EU-Ausland exportiert. Eine hohe Zahl von 0,56 Mio. Fahrzeugen wurde nicht statistisch erfasst und nur 0,41 Mio. Fahrzeuge wurden in der Abfall- bzw. Verwertungsstatistik aufgenommen. Das entspricht einem Anteil von lediglich 14,2 % (UBA 2016). Die tatsächliche Recyclingquote von in Deutschland stillgelegten Fahrzeugen ist daher mit großer Unsicherheit behaftet.

Neben der Richtlinie zur Verwertung von Altfahrzeugen schreibt die Altbatterie-Verordnung (bisher als Richtlinie 2006/66/EG, nun novelliert durch 2018/849/EU) vor, dass mindestens 65 % des Gewichts der in Umlauf gebrachten Blei-Säure-Batterien, 75 % des Gewichts von Nickel-Cadmium-Batterien sowie 50 % des Gewichts sonstiger Altbatterien durch Recycling wiedergewonnen werden müssen. Zusätzlich wird eine Sammelquote von in Geräten eingebauten Batterien und Akkumulatoren festgesetzt. Diese beträgt 25 % ab 2012 und 45 % ab 2016 (Europäisches Parlament 2006, 2018). Ein bereits in anderen Studien angeführtes Maniko der genannten EU-Direktiven ist, dass sich die Recyclingquoten nicht auf einzelne Rohstoffe, sondern lediglich auf das Gesamtgewicht von Batterien und Fahrzeugen bezieht. Damit können die Vorschriften ohne Wiedergewinnung der wichtigen Rohstoffe erreicht werden (Öko-Institut 2017).

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass das Recycling von aktuell in den Fahrzeugen verwendeten Blei-Batterien ein sehr etabliertes, gut funktionierendes System darstellt (International Lead Association 2015; Eurobat 2019). So werden in Europa die Materialverluste, z. B. durch Fahrzeugexporte aus der EU, als gering eingeschätzt. Selbst wenn die Fahrzeuge mit ungeklärtem Verbleib die EU verließen, würde dies die Wiedergewinnungsrate von Blei nicht erheblich reduzieren (Öko-Institut 2016, 2018).

Um die in batterieelektrischen Fahrzeugen verwendeten Traktionsbatterien dem Recycling zuzuführen, müssen sie in eine dafür vorgesehene zentrale Anlage transportiert werden. Dies kann je nach Zustand der Batterien (noch funktionstüchtig oder defekt) unterschiedliche Maßnahmen erforderlich machen, wie Entladung oder gar Tiefentladung inkl. Kurzschließen, Verpackung in einem nichtleitenden und nichtentflammenden Material wie Quarzsand bzw. Deaktivierung in

einem leitenden Medium (UBA 2016). Entsprechend kommt dem Transport von als Gefahrgut eingestuftten Batterien organisatorisch und wirtschaftlich eine besondere Bedeutung zu (UBA 2016).

Das daraufhin stattfindende Recyclingverfahren läuft in aller Regel in mehreren Schritten ab. Abbildung 8-3 zeigt einen beispielhaften Prozess. Zunächst wird die Batterie entladen und das Batteriegehäuse zerlegt, indem das Batteriegehäuse geöffnet und dieses je nach Material (häufig ein Massenmetall wie Edelstahl oder Aluminium) der entsprechenden Recyclingroute zugeführt wird. Anschließend werden die Batteriemodule voneinander getrennt, die verbindenden Kupferkabel entfernt und ebenso wie auch das Batteriemanagementsystem, das zahlreiche bei Elektronikbauteilen übliche Rohstoffe wie Gold, Silber und Tantal sowie viele weitere enthält, in die entsprechenden Recyclingverfahren gegeben. Daraufhin werden die Module zerlegt, wodurch sich wiederum Wertstoffe aus den Modul- und Zellverbindungen sowie der entfernten Modulstruktur ergeben können, die ebenfalls dem Recycling zugeführt werden können. Die beschriebenen Aktivitäten werden aktuell häufig noch manuell vorgenommen werden; insbesondere aus Wirtschaftlichkeitsgründen wird allerdings ein höherer Automatisierungsgrad bei diesen Prozessschritten angestrebt (UBA 2016).

Für das Recycling der nun freigelegten Zellen (teilweise genügt auch eine Zerlegung bis auf Modulebene) existieren verschiedene mechanische, pyrometallurgische und hydrometallurgische Verfahren (Schmidt 2017). Insbesondere für pyrometallurgische Verfahren ergibt sich in der Regel der Vorteil, dass ein Öffnen der Zellen nicht nötig ist (Hagelüken 2019). Die Gestaltung der Prozessführung ergibt sich insbesondere durch die Auswahl der wiederzugewinnenden Rohstoffe. Während in aller Regel Nickel, Kobalt und Kupfer wiedergewonnen werden, ist dies für das auch in der Kathode enthaltene Mangan oder für Lithium selbst deutlich seltener. Das in der Anode enthaltene Graphit oder auch der Elektrolyt gehen häufig, beispielsweise unter Bereitstellung thermischer Energie oder Reduktionspartner, im Prozess verloren (UBA 2016), wobei auch dies vom gewählten Verfahren abhängt (Schwarzer 2019).

Als wichtiges Unternehmen für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien ist Umicore zu nennen, das seit 2011 eine Pilotanlage im belgischen Hoboken mit einer aktuellen Kapazität von 7.000 t/Jahr betreibt (Treffer und Spurr 2018). Das Recyclingverfahren ist ähnlich dem im LiBri-Projekt beschrie-

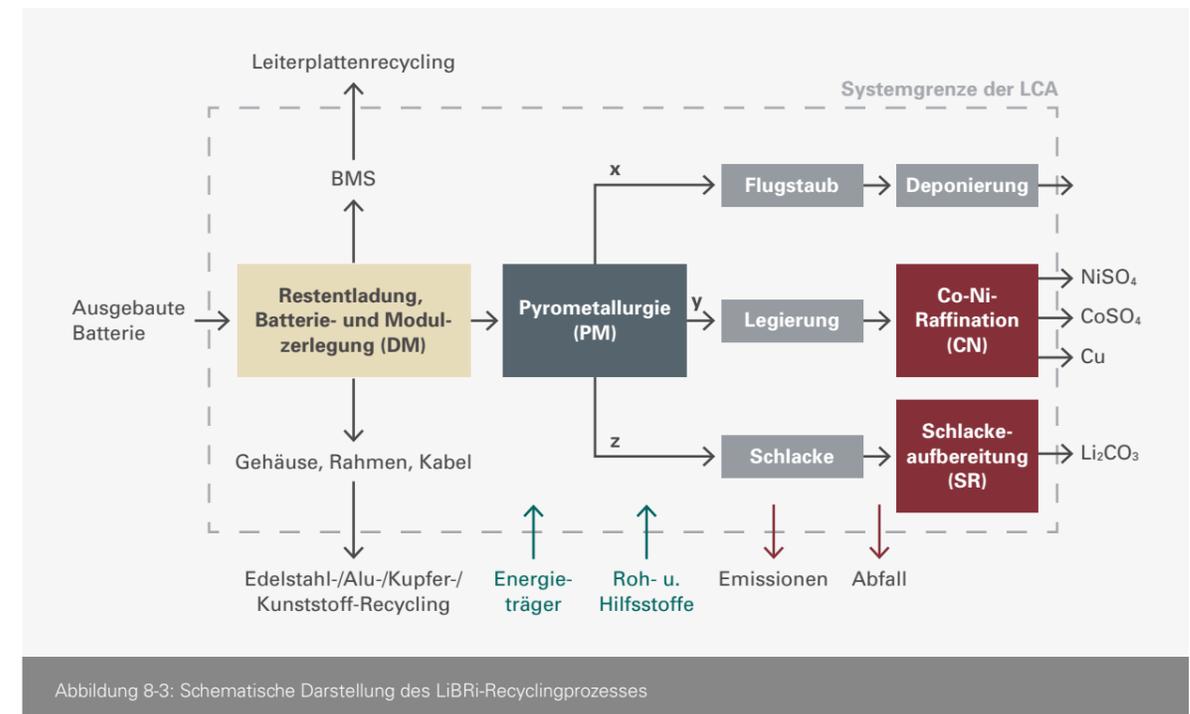


Abbildung 8-3: Schematische Darstellung des LiBri-Recyclingprozesses

benen Vorgehen (Öko-Institut 2016), das einen pyrometallurgischen Schritt vorsieht, in dem eine Legierung zur anschließenden hydrometallurgischen Wiedergewinnung von Nickel, Kobalt und Kupfer erzeugt wird, sowie eine Schlacke, aus der anschließend batterieaugliches Lithiumcarbonat gelöst werden kann (Buchert et al. 2011b). Während die Ergebnisse des LiBri-Projekts noch Entwicklungsbedarf zur sinnvollen Gestaltung der Lithiumwiedergewinnung darlegen (Buchert et al. 2011b; Öko-Institut 2016) und Umicore das Lithium zeitweise nicht aus der Schlacke wiedergewann, wurde dieser Schritt mittlerweile implementiert, so dass nun auch Lithium in dem Recyclingverfahren wiedergewonnen wird (Stahl et al. 2018; Hagelüken 2018). Zuvor schien die Rückgewinnung von Sekundärlithium sich nicht wirtschaftlich darstellen zu lassen, so dass es in einer für den Bausektor und Spezialgebieten wie Unterwasserbau nutzbaren Schlacke verblieb (vgl. Abschnitt 8.2) (European Commission 2017a).

Weitere öffentlich geförderte FuE-Projekte wurden in den vergangenen Jahren zu Fragestellungen rund um das Batterierecycling durchgeführt, wie das LithoRec-Verfahren oder das Projekt EcoBatRec (Buchert und Sutter 2016a, 2016b). Auch

diese Projekte hatten das Ziel, innovative Recyclingverfahren zu entwickeln, um effizient Sekundärrohstoffe für die Batterieherstellung bereitzustellen. Die Frage, wie diese Verfahren, die häufig auf Laborebene entwickelt werden, sich in einem industriellen Maßstab darstellen und wie es dann um deren Wirtschaftlichkeit bestellt ist, kann an dieser Stelle nicht mit Sicherheit beantwortet werden. Dennoch sind Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, beispielsweise zum LithoRec-Verfahren, veröffentlicht worden, aus denen hervorgeht, dass die Menge an Batterien, die dem Recyclingprozess zugeführt werden können, ein zentraler Parameter für dessen Wirtschaftlichkeit ist (Kwade 2018).

Interessant ist auch die nähere Betrachtung der durchgeführten Ökobilanzen zu den Verfahren. Zwar werden den genannten veröffentlichten Recyclingverfahren in aller Regel Nettogutschriften beigemessen (d. h. geringere Umweltlasten aus der Durchführung des Recyclingverfahrens, als durch die Bereitstellung von Primärmaterial anfallen), allerdings ist es interessant, von welchen Materialien die größten Beiträge zu diesen Gutschriften ausgehen. Hinsichtlich des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen sind die Gutschriften

durch das Recycling der Massenmetalle des Batteriegehäuses oder der Kupferleitungen geprägt, zu deren Rückgewinnung nur geringe Aufwendungen notwendig sind. Für die Wiedergewinnung der Kathodenmaterialien Nickel und Kobalt oder auch für die Wiedergewinnung von Lithium sind jedoch entsprechend den genannten Verfahren deutlich größere Aufwände nötig, denen geringere Gutschriften durch die Substitution von Primärmaterial gegenüberstehen (Abschnitt 7.2). Bei den Umweltauswirkungen Versauerungs-Eutrophierungs- und Oxidantienbildungspotenzial hingegen trägt die Wiedergewinnung der Kathodenmaterialien deutlich bis maßgeblich zur Erzielung der Nettogutschriften bei (LithoRec 1, LithoRec 2, LiBRI, EcoBatRec). Hieran zeigt sich, dass THG-Emissionen und Energiebedarf natürlich wichtige Aspekte sind, jedoch im Rahmen von Rohstoffbetrachtungen weitere, ebenso wichtige Aspekte nicht außer Acht gelassen werden sollten (Abschnitt 7).

Um die bereits genannten Potenziale des Recyclings voll auszuschöpfen, empfehlen sich Kooperationen aller Stakeholder entlang der Wertschöpfungskette. So arbeiten beispielsweise die Unternehmen Umicore und BMW und das Batterieunternehmen Northvolt zusammen und auch zwischen Umicore und Audi bzw. mit Toyota haben sich Kooperationen gebildet (UECT-Präsentation). Des Weiteren versucht die Politik durch entsprechende Maßnahmen die Recyclingaktivitäten zu fördern. So wurden kürzlich in den USA öffentliche Gelder für FuE-Aktivitäten angekündigt (Gardner 2017) und in China zunehmend Regelungen für den Umgang mit gebrauchten Fahrzeugbatterien eingeführt (Grundhoff 2018; UD 2018). Auch in Europa erscheinen die bereits angesprochenen konkreteren Recyclingvorgaben bestimmter Rohstoffe nach Überarbeitung der aktuellen Altbatterierichtlinie wahrscheinlich (Öko-Institut 2017).

An dieser Stelle sei kurz die Möglichkeit erwähnt, gebrauchte Fahrzeugbatterien in sogenannten Second-Life-Anwendungen einzusetzen. Damit wird die Verwendung von Batterien bezeichnet, die zwar noch funktionstüchtig sind, deren Leistungsfähigkeit aber nicht mehr den Anforderungen in einem Automobil genügen. Diese Batterien können somit nach der Verwendung im Fahrzeug in weniger anspruchsvollen Anwendungen genutzt werden, beispielsweise als stationärer Batteriespeicher. In einer detaillierten Untersuchung zur Second-Life-Anwendung von gebrauchten Fahrzeugbatterien werden verschiedene Anwendungsfälle angeführt. Aktuell stellen insbesondere die Verwendung der Batterien in einem zentralen System zur Bereitstellung von Primärregelleistung

oder als dezentraler Pufferspeicher in Haushalten attraktive Optionen dar. Zwar erscheinen die Marktvolumina der beiden Anwendungen angesichts der zukünftig notwendigen Batterieproduktionskapazitäten relativ gering, doch können diese Anwendungen eine lukrative Zwischennutzung darstellen, um die Batterien anschließend in adäquaten Mengen mittels effizienter Wiedergewinnungsprozesse zurückzugewinnen. Allerdings bringt die Möglichkeit einer Second-Life-Nutzung auch Herausforderungen mit sich. Zum einen müssen sich entsprechende Geschäftsmodelle noch etablieren, zum anderen ist die Verwendbarkeit häufig von der Historie der Batterie und den am Ende des First Life vorhandenen Leistungsdaten der Batterie abhängig. Die Historie von Batterien ist oft unbekannt, was für einen eventuellen Second-Life-Nutzer ein hohes finanzielles Risiko darstellen kann.

8.5 Recycling von Platin aus Brennstoffzellen

Wittstock et al. untersuchen in einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2016 die Möglichkeiten und Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Recycling von Brennstoffzellen (Wittstock et al. 2016). In dem Artikel wird Platin auf Anode und Kathode der Brennstoffzelle aufgrund des hohen Geldwertes als der wesentliche Treiber für das Recycling angesehen. Andere Materialien, wie zum Beispiel die Polymermembran, seien eher von zweitrangigem Interesse. Andererseits, so die Autoren, können sich während der Nutzung kleine Platinpartikel von Anode und Kathode lösen und in die genannte Membran diffundieren. Daher sollten auch die Membran und andere Teile der Brennstoffzelle nicht vom Recycling ausgeschlossen werden. Die folgende Beschreibung der Recyclingkette von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (FCEV) entstammt in großen Teilen einer Beschreibung von Wittstock et al., die wiederum auf einer ausführlichen Literaturrecherche basiert (Wittstock et al. 2016).

Rückführung und Rückbau von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen

Der erste Schritt eines Recyclingpfades ist, wie auch zuvor für Batterien bereits beschrieben, das Sammeln und Zurückführen der ausgedienten Fahrzeuge. In der heutigen Praxis werden abgemeldete Verbrennerfahrzeuge jedoch in vielen Fällen in andere Länder exportiert, wo sie anschließend weiterbetrieben werden (Wittstock et al. 2016). In diesen Ländern bestehen oft nicht die Voraussetzungen, um ein sicheres und umweltverträgliches Recycling zu ermöglichen. Dieser Umstand führt zu relativ geringen Recyclingquoten von Platin

aus Abgaskatalysatoren von 50 % bis maximal 60 % (Hagelücken 2012), während in industriellen Anwendungen Raten von über 90 % erreicht werden. Nach Aussage von Wilts et al. führen Defizite in der Rückführung heutzutage zum größten Verlust von Platin in der Recyclingkette (Wilts et al. 2011). Die Situation in anderen Ländern außerhalb Europas ist noch kritischer. So wurden in China im Jahr 2016 nur ca. ein Viertel der abgeschriebenen Fahrzeuge an qualifizierte Recyclingbetriebe gegeben (Pehlken et al. 2018).

Da FCEV eine komplexere Infrastruktur der Kraftstoffbereitstellung benötigen als Verbrennerfahrzeuge, ist es unwahrscheinlich, dass sie in ähnlichem Maße nach ihrer Nutzungsdauer ins Ausland exportiert werden, wenn eine solche Infrastruktur zum entsprechenden Zeitpunkt dort noch nicht oder nicht in gleichem Maße vorhanden ist. Insofern könnten Brennstoffzellen eine im Vergleich zu Verbrennern effizientere Rückführung der Fahrzeuge ermöglichen, was zu höheren Recyclingquoten von Platin führen könnte. Darüber hinaus sei erwähnt, dass es sich bei Brennstoffzellen, im Unterschied zu Katalysatoren von Verbrennerfahrzeugen, um geschlossene Systeme handelt. Daher kann es selbst bei einem Defekt während des Betriebs nicht zu Verlusten des wertvollen Platins kommen. Selbst bei Katalysatoren, die offene Systeme darstellen, kommen Verluste während des Betriebs oder bei einem Defekt sehr selten vor (Hagelücken 2019).

Der nächste Schritt innerhalb der Recyclingkette nach der Rückführung der Fahrzeuge ist der Rückbau der einzelnen Komponenten. Auch dabei sehen Wittstock et al. das Potenzial zu geringerem Platinverlust, als es bei Abgaskatalysatoren der Fall ist. Zum einen wird dies damit begründet, dass die Platinkonzentration in Brennstoffzellen und damit auch der Geldwert höher sei, zum anderen wird wieder auf die Komplexität der Technologie hingewiesen, durch die vermutlich nur einige wenige, spezialisierte Betriebe den Rückbau von FCEV vornehmen werden. Außerdem wird erwähnt, dass der Rückbau an sich bei FCEV weniger arbeitsintensiv sei als bei Verbrennerfahrzeugen. Für Letztere wurde in der Vergangenheit ermittelt, dass in ca. 4 % der Fälle der Katalysator vor der Verschrottung des Fahrzeugs nicht entfernt wird (Hagelücken et al. 2005).

Relativiert wird dieses erhöhte Potenzial einer besseren Recyclingquote als bei Katalysatoren von Verbrennern durch die Bemühungen, den Anteil von Platin in Brennstoffzellen weiterhin zu senken. Sollte der Platinanteil zu gering werden, könnte der Nutzen durch das wiedergewonnene Material

möglicherweise den Aufwand des Recyclingprozesses nicht mehr rechtfertigen. Dies wird jedoch von Experten als sehr unwahrscheinlich angenommen, da aus prozesstechnischer Sicht das Wiedergewinnen bei geringerem Platinanteil nicht komplizierter wird (Hagelücken 2019).

Recyclingverfahren und Rückgewinnung von Platin

Wittstock et al. beschreiben mehrere patentierte Verfahren zur Rückgewinnung von Platin aus Brennstoffzellen (Wittstock et al. 2016). In den meisten Fällen liegen die erreichbaren Recyclingquoten dabei deutlich über 95 %. Hydrometallurgische Prozesse zur Rückgewinnung werden als vielversprechend dargestellt, besonders aufgrund der hohen Rückgewinnungsraten. Als zusätzlicher Vorteil dieser Art von Prozessen wird erwähnt, dass Membranen als Ganzes erhalten bleiben und daher wiedergewonnen und dann einer neuen Anwendung zugeführt werden könnten. In einem Expertengespräch wurde diese Möglichkeit jedoch als eher unwahrscheinlich erachtet, da Bauteile aus sekundären Quellen als risikobehaftet angesehen werden und sich Standards und Erwartungen bezüglich Größe und Qualität während der Lebenszeit eines Fahrzeuges vermutlich deutlich weiterentwickeln (Hagelücken 2019). Bei pyrometallurgischen Prozessen hingegen werden nur Materialien rückgewonnen und keine Bauteile der Brennstoffzelle als Ganzes. Es wird allerdings erwähnt, dass alle genannten Verfahren bis zum Erscheinen der Veröffentlichung (im Jahr 2016) nicht im industriellen Maßstab realisiert wurden. Auch die Literaturrecherche neuerer Quellen ergab keinen eindeutigen Trend hin zur Kommerzialisierung eines oder mehrerer spezieller Verfahren. Von Experten als wahrscheinlich erachtet werden aber pyrometallurgische Verfahren, die den bereits für Katalysatoren genutzten Hochofenverfahren ähneln (Hagelücken 2019).

In anderen Quellen, wie z. B. der Ökobilanz des gesamten Lebenszyklus einer PEM-Brennstoffzelle von Notter et al., wird ebenso von einer hohen Recyclingrate von 95 % des Platins ausgegangen (Notter et al. 2015). Dabei wird ein pyrometallurgischer Prozess angenommen. Durch die hohe Recyclingrate wird in der Ökobilanz mehr als ein Drittel des ursprünglichen ökologischen Fußabdrucks der Brennstoffzellenproduktion wieder ausgeglichen bzw. gutgeschrieben.²¹ Aufwendungen für den Recyclingprozess nehmen einen eher geringen Stellenwert ein.

21 | Die Gesamtheit aller Umwelteinflüsse wurde in der Betrachtung mit der Ökobilanz-Methode ReCiPe bestimmt.

Relevanz im Verhältnis zum Gesamtbedarf von Platin

In Anbetracht des zu erwartenden steigenden Bedarfs an Platin für FCEV sind etwaige Recyclingquoten ausschlaggebend, um sowohl die zukünftige Situation von Angebot und Nachfrage als auch die Preisentwicklung zu beurteilen (vgl. Abschnitt 6.4.5).

Agora Verkehrswende ermittelt in einem Synthesepapier zur Rohstoffkritikalität die Anteile des zukünftigen Platinbedarfs der Elektromobilität, die aus Sekundärmaterialien gedeckt werden können. Für das Referenzjahr (2015) wird dieser Anteil mit ca. 30 % beziffert. Für die betrachteten zukünftigen Jahre ergeben sich Anteile von bis zu ca. 50 % (2030) und bis zu ca. 60 % (2060) (Öko-Institut 2017).

8.6 Recyclingsituation für Seltenerdmetalle

Eine Voraussetzung für die Anwendung von pyrometallurgischem Metallrecycling ist, dass die verschiedenen Metalle ausreichend unterschiedliche thermodynamische Eigenschaften besitzen. Andernfalls können mit derartigen Verfahren lediglich Legierungen oder unreine Metalle wiedergewonnen werden. Deshalb sind für das Recycling der chemisch ähnlichen Seltenerdmetalle (vgl. Abschnitt 4.5) hydrometallurgische Prozesse und Solvent-Extraktionsverfahren notwendig. Das UNEP schließt von der geographischen Konzentration der Seltenerdmetalltechnologie in China auf die zukünftige Recyclingsituation. Laut seiner Einschätzung begrenzt dies auch Recyclingaktivitäten an anderen Orten. Des Weiteren existieren aktuell gewisse Herausforderungen im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit sowie die Metallurgie der Recyclingprozesse: Während einerseits Synergiepotenziale wie Skaleneffekte für die Zusammenlegung verschiedener Batterien sowie von anderen zu recycelnden seltenerdmetallhaltigen Produkten sprechen, stellt genau dies andererseits ein Problem für die Raffinationsverfahren dar, weil die zahlreichen Produkte unterschiedliche Seltenerdmetalle in verschiedenen Mengen enthalten. Der Report kommt zu dem Schluss, dass, wie auch zuvor bereits beschrieben, die Zukunft des Seltenerdmetallrecyclings von Sammelverfahren, von der Komplexität und dem Aufwand der Recyclingverfahren sowie letztendlich von dessen Wirtschaftlichkeit im Unterschied zur Primärmaterialförderung abhängt (Graedel et al. 2011).

Wie in Abschnitt 8.2 bereits dargestellt, sind die Aktivitäten im Bereich Seltenerdrecycling aktuell noch auf einem relativ niedrigen Niveau. Nachfolgend wird daher ein Überblick über aktuelle Entwicklungen im Bereich Seltenerdmetallrecycling gegeben.

Eine umfassende Studie des Öko-Instituts identifiziert den Grundlagenforschungsbedarf hinsichtlich der Seltenerdmetalle in Europa. Ebenso empfiehlt das Institut Pilotprojekte sowie die Einführung eines Sammel- und Vorbehandlungssystems. Eine wichtige Erkenntnis der Studie ist, dass die aktuell anfallenden Recyclingmengen an Elektromotoren und Permanentmagneten dem Stahl- oder Kupferschrottreycling oder gar der kommunalen Abfallverwertung zugeführt werden und so laut Experteneinschätzungen durch Industrieunternehmen über 40 t Neodym-Eisen-Bor-Magnete aus Industrieanwendungen in Deutschland aufgrund mangelnder Infrastruktur verloren gehen (Buchert et al. 2014).

In dem vom BMBF geförderten Project MORE (Motor Recycling) wurden im Jahr 2014 die Möglichkeiten des Recyclings von Neodym und Dysprosium untersucht, um die zukünftige Versorgungslage der Rohstoffe abzuschätzen (Hörnig 2014). Laut der Studie ist ein grundsätzliches Problem der bisherigen Recyclingvorgänge von Altfahrzeugen, dass die in den Motoren eingesetzten Seltenerdmetalle nicht aus dem Schrott abgetrennt werden und somit für ein Recycling verloren gehen. Ziel von zukünftigen Recyclingverfahren sollte daher sein, nichtzerstörende Trenn- und Demontage-Verfahren zu verwenden. Bisher wird der Antriebsstrang eines Altfahrzeuges entnommen und Motor und Getriebe werden voneinander getrennt. Elektromotoren werden weiter zerlegt und Rotor und Stator separat verwertet. Kupferdraht wird aus dem Stator entnommen und bestehenden Recyclingkreisläufen zugeführt. Der Rotor wird dabei häufig als Mischschrott entsorgt, ohne die enthaltenen Magnete zu separieren. In dem Projekt wurde mit Hilfe einer Demonstrator-Anlage gezeigt, dass die Demontage der Magnete zerstörungsfrei möglich ist. Der Bericht listet die folgenden drei Routen auf, über die anschließend das Magnetmaterial behandelt werden kann.

Die erste Möglichkeit ist eine funktionelle Wiederverwendung. Langzeitversuche im Fahrzeugbetrieb zeigten, dass die Magnete während der Nutzungsphase weder entmagnetisiert noch beschädigt werden (Hörnig 2014). Daher erscheint eine direkte Wiederverwendung grundsätzlich möglich. Trotzdem wird diese Route von den Autoren als unwahrscheinlich angenommen, da Geometrien und Legierungen verschiedener Motorhersteller sehr unterschiedlich sein können. Auch andere Märkte wurden für die direkte Verwendung der Magnete analysiert, jedoch aus ähnlichen Gründen für ungeeignet befunden.

Eine zweite Möglichkeit stellt das werkstoffliche Recycling des Magnetmaterials (Neodym, Eisen, Bor) dar. Im Projekt wurde gezeigt, dass die Rückgewinnung von Klebstoffen befreiter, sortenreiner, nicht oxidierten Magnetstücke möglich ist und der so gewonnene Werkstoff direkt wieder in den Stoffkreislauf der Magnetproduktion eingeführt werden kann (Hörnig 2014). Im angewendeten Verfahren wurde aufzubereitendes Magnetmaterial durch Wasserstoffversprödung zerkleinert und wieder mit Primärrohstoffen zu Magnetmaterial verarbeitet. Dadurch wurden Magnete mit 30 % Anteil an recyceltem Material gefertigt. Die Eigenschaften dieser Magnete entsprechen zwar den Spezifikationen von herkömmlichen Motormagneten, es wurde jedoch eine Verringerung der Remanenzinduktion um 3 % festgestellt. In der Elektromobilität werden Magnete mit hoher Remanenz (Energiedichte) gefordert. Daher sei es fraglich, so die Autoren der Studie, ob Magnete aus diesem Recyclingprozess für eine weitere Verwendung im Automobilbereich geeignet seien.

Die dritte untersuchte Methode stellt die Rückgewinnung der Magnetrohstoffe dar. Dafür wurde ein hydrometallurgischer Prozess angewendet, wie er in ähnlicher Form auch für die Seltenerdextraktion aus Erzen eingesetzt wird.

Die Autoren betonen, dass der verwendete Prozess im Vergleich zur Primärproduktion mit deutlich geringerem verfahrenstechnischem Aufwand möglich sei. Somit wurde die Rückgewinnung von seltenen Erden demonstriert, allerdings nur in Form von Oxiden. Für den Einsatz in Magneten werden die entsprechenden Metalle benötigt. Die Reduzierung der Oxide zu Metallen kann jedoch mit heute kommerziell eingesetzten Prozessen erfolgen (Hörnig 2014).

Es zeichnet sich zusammenfassend ab, dass das Recycling von Seltenerdmetallen aktuell (noch) nicht etabliert ist, obwohl die Aktivitäten und Publikationen dessen Notwendigkeit und Potenzial sowie die notwendigen Schritte identifiziert haben. Es zeichnet sich zudem ab, dass politische Akteure und Industrieunternehmen erste Maßnahmen in die richtige Richtung umgesetzt haben.

8.7 Recyclingsituation für Kupfer aus Kabeln und Elektromotoren

Kupfer ist aufgrund seiner guten elektrischen Leitfähigkeit essenziell für die Elektromobilität. Laut einer Infobroschüre der Copper Development Association beträgt die Menge an Kupfer in Batterie-Elektrofahrzeugen im Mittel mehr als das Drei-

fache als in herkömmlichen Verbrenner-PKW (Copper Development Association Inc. 2017): Während in einem Verbrenner zwischen 8 und 22 kg Kupfer verbaut sind, können es in BEV über 80 kg sein, die sich vor allem im Kabelbaum, in Elektromotoren sowie auch in der Li-Ionen-Batterie befinden (UBS Limited 2017). Auch in automobilen Brennstoffzellen bzw. deren Hilfskomponenten finden sich noch einige Kilogramm Kupfer (ca. 100 g pro kW Leistung der Brennstoffzelle) (Öko-Institut 2016). Mit fortschreitender Entwicklung der Elektromobilität ist daher auch ein beachtliches Wachstum der globalen Kupfernachfrage zu erwarten (vgl. Abschnitt 6.6.4) – ebenso wie in zahlreichen weiteren Sektoren.

Wie zuvor dargestellt (Abschnitt 8.2), stellt Recycling bereits heute einen wichtigen Teil zur Deckung der Kupfernachfrage dar. Dennoch bleibt Primärkupfer angesichts des wachsenden Bedarfs eine notwendige Bezugsquelle (Wurster 2018). So sind von den ca. 600 Mio. t, die bislang gefördert wurden, aktuell noch ca. 441 Mio. t in Verwendung (Wurster 2018). Kupfer hat die besondere Eigenschaft, dass es ohne Qualitätsverluste aus Kabelbäumen und Elektromotoren zurückgewonnen werden kann (Lee und Shin 2018). Rücklaufsysteme und Recyclingprozesse sind weitläufig etabliert und kommerziell verfügbar. Trotz der guten Wiederverwertbarkeit des Metalls gehen allerdings laut dem World Copper Factbook der International Copper Study Group (ICSG) jährlich mehr als 8 Mio. t im Kupferkreislauf verloren (bei einer jährlichen Förderung von ca. 19 Mio. t) (International Copper Study Group 2018; Wurster 2018). Die größten Verluste treten durch nicht für das Recycling gesammeltes Kupfer auf. Ein weiterer großer Anteil ergibt sich durch Verluste bei der Separation des Kupfers aus Produkten.

Die Gewinnung von Kupfer aus Elektromotoren ist verhältnismäßig unkompliziert. Dabei werden die Kupferwicklungen zunächst mechanisch entnommen. Die mechanische Entnahme kann sehr arbeitsintensiv sein, wobei Methoden zur Vereinfachung, beispielsweise ein Abkühlen auf tiefe Temperaturen, das die Drähte brüchig macht, untersucht werden. Unter Umständen ist es notwendig, die Drähte mithilfe verdünnter Säure zu waschen, um Überreste von Lacken und anderen Unreinheiten zu entfernen. Das Kupfer wird anschließend geschmolzen und von Begleitelementen getrennt, woraufhin es in anderer Form wiederverwendet werden kann (Scott 2017).

Insgesamt lässt sich also zusammenfassen, dass die Wiedergewinnung von Kupfer ein sehr gutes Beispiel für funktionierendes Recycling darstellt. Dennoch können auch hier die

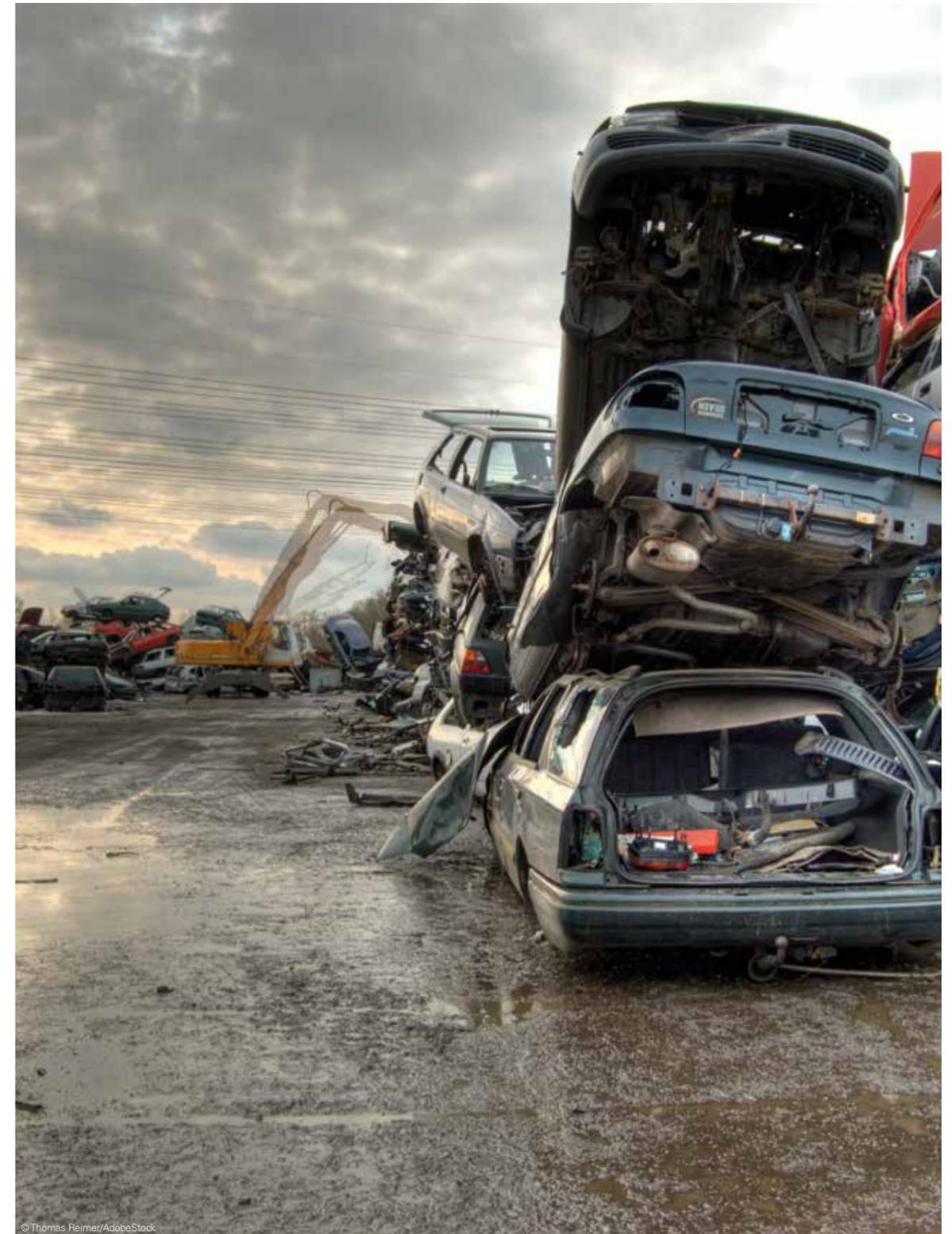
Erträge und Effizienzen noch gesteigert werden, um die Materialverluste zu minimieren.

8.8 Fazit

Die Wiedergewinnung von Materialien durch Recycling ist insbesondere für Metalle ein äußerst wichtiger Aspekt und stellt eine große Chance dar, die vielfältige Vorteile bietet. So sind der Energiebedarf für das Recycling und die mit diesem einhergehenden THG-Emissionen häufig deutlich niedriger als für die Primärproduktion der Rohstoffe. Doch gerade in der Diskussion um Rohstoffe gibt es neben diesen beiden eine ganze Reihe weiterer Verbesserungspotenziale. Dies umfasst weitere Umweltauswirkungen, wie beispielsweise die Emission von säurebildenden Substanzen, die für Bergbauaktivitäten besonders wichtig ist. Außerdem lässt sich durch effizientes Recycling die Importabhängigkeit für das eher rohstoffarme Europa reduzieren, was eine wichtige Maßnahme im Rahmen von wirtschaftlichen und politischen Strategien bildet. Nicht zu vergessen sind natürlich auch die weitreichenden ethischen und sozialen Probleme, die rohstofffördernde Aktivitäten oft mit sich bringen (Kapitel 9). Der wichtigste Aspekt ist allerdings, dass durch Recycling Rohstoffe in der „Technosphäre“ gehalten werden, die andernfalls womöglich verloren gehen würden, beispielsweise durch dissipative Verluste oder auch in Verbindungen, aus denen sie nur sehr schwer herauslösbar sind. Somit hilft Recycling, die Rohstoffgrundlage, die der Menschheit zur Verfügung steht, für die Zukunft zu erhalten.

Ein zentrales Ergebnis dieses Kapitels ist, dass die technischen Prozesse zur Wiedergewinnung der als kritisch identifizierten Rohstoffe aus Batterien und Brennstoffzellen existieren. Allerdings existiert aktuell noch keine ausreichend ausgebaute Infrastruktur, um die Fahrzeuge bzw. die relevanten Komponenten effektiv zu sammeln und dann einem großskaligen Recyclingprozess zuzuführen. Ebenso können weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten dazu beitragen, die Recyclingprozesse effizienter und vor allem auch wirtschaftlicher zu machen und dadurch die zukünftige Verfügbarkeit von Sekundärmaterial zu steigern. Darüber hinaus ist es wünschenswert, dass sich die Anzahl der recyclebaren Materialien erhöht und in Zukunft weitere Metalle wirtschaftlich wiedergewonnen werden können. Ein Beispiel hierfür ist das in der Anode der Batterien verwendete Graphit.

In diesem Kapitel wurden verschiedene Aspekte des Recyclings der als kritisch identifizierten Rohstoffe dargestellt. Dabei wurde nicht explizit auf den Unterschied der in Fahrzeugen benötigten Mengen der einzelnen Rohstoffe eingegangen. Betrachtungen auf Fahrzeugebene finden in Kapitel 10 statt.





09

Ethische Aspekte

09

Ethische Aspekte

Dieses Kapitel behandelt die ethischen Aspekte, die mit dem Abbau der für Brennstoffzellen- und Batterietechnologien als kritisch identifizierten Rohstoffe verbunden sind. Zweifellos stellt die Einhaltung von ethischen Grundsätzen einen zentralen Aspekt im Zusammenhang mit der Rohstoffgewinnung dar. Zunächst stellt sich für eine nähere Analyse jedoch die grundsätzliche Frage nach einer Definition des Begriffs Ethik. So wird Ethik beispielsweise als „Gesamtheit sittlicher Normen und Maximen, die einer verantwortungsbewussten Einstellung zugrunde liegen“ beschrieben (Duden 2018).

Vor dem Hintergrund dieser Definition von Ethik werden nachfolgend verschiedene Auswirkungsdimensionen ethischen Handelns aufgezeigt. Die Ergebnisse hierzu basieren auf einer Literaturrecherche, die zu einem Großteil online durchgeführt wurde. Es werden für jedes der zu betrachtenden Materialien die nachfolgend dargestellten Dimensionen beleuchtet.

- Wichtige Aspekte, die in direktem Zusammenhang mit Bergbauaktivitäten stehen, sind die **Arbeitsbedingungen** und deren Auswirkungen auf die Gesundheit der Menschen, die unmittelbar im Bergbau tätig sind. Hier kann Verantwortungsbewusstsein gegenüber den im Bergbau tätigen Menschen, z. B. durch adäquate Sicherheitsvorkehrungen oder gesundheitsschützende Maßnahmen, ausgedrückt werden.
- Die durch den Rohstoffabbau verursachten **Umweltauswirkungen**, die über die bisherige ökologische Betrachtung (Abschnitt 7) hinausgehen, bilden eine weitere im Rahmen dieser Studie betrachtete Dimension der Ethik. Sie umfassen Auswirkungen auf die Umweltmedien Luft, Wasser und Boden, die die Lebensgrundlagen des Menschen in zunehmendem Maße einschränken. Je nach Schwere der Umweltauswirkungen kann es hier sogar Überschneidungen mit Rechtsverletzungen oder andere gesellschaftliche Nachteile geben, die im

Gegensatz zu einer verantwortungsvollen Einstellung und dem dazu notwendigen Handeln stehen.

- Die Wahrung der **Grundrechte** ist eine sehr vielseitige Dimension, die das Verhalten von Staaten oder Unternehmen gegenüber dem einzelnen Bürger sowie unter den Bürgern bestimmt. Zu den Grundrechten zählen neben Bürgerrechten auch die Menschenrechte, die Versammlungs- und Vereinigungsfreiheit sowie das Recht auf Gesundheit und Bildung.
- Die Dimension **politische Rahmenbedingungen** berücksichtigt das politisch-gesellschaftliche Umfeld, in dem sich die Aktivitäten zur Förderung und Bereitstellung der Rohstoffe befinden. So stellen die politischen und institutionellen Strukturen eines Staates oft eine entscheidende Grundlage für die Gestaltung der Lieferkette dar. In dieser Studie werden die politischen Rahmenbedingungen in den wichtigsten an der Rohstoffförderung beteiligten Ländern durch die Worldwide Governance Indicators (WGI) ermittelt, die aus einem langjährigen Forschungsprogramm der Weltbank resultieren (siehe auch Abschnitt 3.3 zur Kritikalitätsbewertung).

Die sechs verwendeten Indikatoren sind folgende:

1. Mitspracherecht und Verantwortlichkeit
2. Politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt oder Terrorismus
3. Rechtsstaatlichkeit
4. Regierungsqualität
5. Korruptionskontrolle
6. Wirksamkeit der Regierung

Für die vorliegende Betrachtung wurde die Auswertung nach Perzentilen („Percentile rank among all countries“) verwendet, die alle betrachteten Länder auf einer Skala zwischen 0 (niedrigste und schlechteste Bewertung) und 100 (höchste und beste Bewertung) einstuft. In den

nachfolgenden Tabellen wurden die Werte zwischen 0 und 25 in einem dunklerem Gelbton und jene zwischen 25 und 50 in einem helleren Gelbton eingefärbt, um eine Bewertung der entsprechenden politischen Rahmenbedingungen in den betrachteten Abbauländern in den niedrigeren Bereichen der Bewertungsskala farblich hervorzuheben.

- **Gesellschaftliche Beiträge** sind schließlich eine Möglichkeit, mit der z. B. ein Bergbauunternehmen seiner sozialen Unternehmensverantwortung gerecht werden kann. So kann es die zuvor beschriebenen ethischen Dimensionen adressieren, indem es im Rahmen seiner wirtschaftlichen Aktivitäten im Land einen positiven Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leistet.

Bevor dieses Kapitel mit einer Zusammenfassung der genannten ethischen Aspekte schließt, wird ein Überblick über Initiativen verschiedener Akteure, insbesondere der Automobilindustrie, gegeben sowie daraus abgeleitet, welche Erfolge und Potenziale diese Aktivitäten bereits verbucht haben bzw. diese noch erzielen können.

9.1 Lithium

Arbeitsbedingungen

Die Recherche der Arbeitsbedingungen im Lithiumabbau ergab für Australien, Argentinien und Chile ein eher positives Bild. In Australien zeichnen sich die Arbeitsbedingungen offenbar durch eine gut ausgebaute Infrastruktur in den Minen, hohe Sicherheitsstandards und ein gutes Bildungsangebot aus (Creagh 2018). Im Rahmen der Lithiumrecherche gewann ein umfangreicher Artikel der Washington Post über das Lithiumdreieck, das sich über Chile, Argentinien und Bolivien erstreckt, der im Dezember 2016 veröffentlicht wurde, besondere Bedeutung. Der Artikel berichtet von guter Bezahlung im Vergleich zum regionalen Durchschnitt, Ausbildungsmöglichkeiten sowie auf der Basis von vor Ort durchgeführten Interviews von insgesamt zufriedenen Bergarbeitern (Frankel und Whoriskey 2016).

Umweltauswirkungen

Es scheint, dass der Lithiumabbau in Australien unter weitgehend umweltschonenden Bedingungen stattfindet, was laut Australian Mining ein entscheidender Faktor sei, um den Rohstoff dort auch in Zukunft weiter abzubauen (Creagh 2018).

Im Gegensatz dazu stehen Berichte über die Atacama-Wüste, wo Lithium aus Sole gewonnen wird, die aus Salzseen gefördert wird. Wissenschaftler warnen vor den unklaren Konsequenzen dieser Form des Lithiumabbaus für die lokale Wasserversorgung sowohl für Chile als auch für Argentinien, da die Verbindung zu Trinkwasserquellen nicht erforscht ist (Frankel und Whoriskey 2016).

Eine ZDF-Reportage quantifiziert das täglich geförderte Wasservolumen pro Förderstätte mit 21 Mio. Litern, obgleich die Atacama-Wüste eine der trockensten Regionen der Welt ist (ZDF Mediathek 2018).

Grundrechtsgefährdungen

Der Artikel der Washington Post beschreibt einen Konflikt der indigenen chilenischen Bevölkerung der Atacama-Wüste mit dem Lithiumabbau vor Ort. Die Urbevölkerung sei nicht nur im Besitz bestimmter Boden- und Wasserrechte, sondern die Orte der Förderung hätten für sie auch religiöse Bedeutung vor dem Hintergrund der Pachamama, der personifizierten Erdmutter (Frankel und Whoriskey 2016).

Da es kein offizielles Verfahren gibt, gestalten sich die Kommunikation zwischen den indigenen Bevölkerungsgruppen und den Bergbauunternehmen schwierig (Frankel und Whoriskey 2016). Laut dem Artikel der Washington Post ist der hohe Wasserverbrauch generell als problematisch zu sehen. So könne die örtliche Bevölkerung in der argentinischen Atacama-Region kaum mehr für die Kosten ihrer Trinkwasserversorgung sowie der Kanalsysteme aufkommen, so dass beispielsweise das Dorf Pastos Chicos mit Trinkwasser von außen versorgt werden müsse (Frankel und Whoriskey 2016).

Politische Rahmenbedingungen

Die vier größten Lithiumabbauländer sind Australien, Chile, Argentinien sowie China. Sie deckten in Summe knapp 93 % der weltweiten Lithiumförderung im Jahr 2015 ab. Während die politischen Rahmenbedingungen für Australien und Chile von den Weltbank-Indikatoren als relativ unbedenklich dargestellt werden, erscheinen für Argentinien die Aspekte Rechtsstaatlichkeit, Regierungsqualität und Korruptionskontrolle etwas bedenklicher. Darüber hinaus weist China für den Indikator „Politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt oder Terrorismus“ eine Bewertung in der unteren Hälfte der relativen Länderbewertung und für den Indikator „Mitspracherecht und Verantwortung“ einen sehr niedrigen Wert von 7,9 auf.

	Australien	Chile	Argentinien	China
Förderung 2015	13.642 t	10.599 t	3.608 t	2.000 t
Mitspracherecht und Verantwortlichkeit	94,6	79,3	65,5	7,9
Politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt oder Terrorismus	77,6	61,0	53,3	36,7
Rechtsstaatlichkeit	93,3	81,7	46,2	44,7
Regulierungsqualität	98,1	88,9	41,4	48,6
Korruptionskontrolle	92,8	82,2	47,6	46,6
Wirksamkeit der Regierung	92,3	77,9	59,6	68,3

© World Bank 2017; Förderung aus DERA 2018

Tabelle 9-1: Politische Bedingungen – WGI der Weltbank für die Top-4-Lithiumabbauländer (Referenzjahr 2017)

In einem Beitrag der Deutschen Welle wird von Hinweisen berichtet, dass die chilenische Politik durch den Lithiumabbau beeinflusst wird, indem z. B. der Inhalt der Gesetze zur Wasserregulierung durch korrupte Handlungen beeinflusst wird (Boddenberg 2018). Dieses Beispiel zeigt, dass die Einschätzung auf Basis der allgemeinen Weltbank-Indikatoren nur die generellen politischen Rahmenbedingungen eines Landes darstellt. Dies muss nicht unbedingt die konkrete Situation bei der Förderung eines bestimmten Rohstoffs widerspiegeln.

Gesellschaftliche Beiträge

Die Recherchen der Washington Post zeigen, dass das kanadisch-chilenische Joint Venture Minera Exar sich bemüht, die argentinische Bevölkerung an der Entwicklung positiv zu beteiligen, indem Arbeitskräfte vor Ort angeworben und lokale Gemeinschaftsprojekte durchgeführt werden. Die Bergbauunternehmen selbst betonen, dass sie sich ihrer Unternehmensverantwortung stellen, indem sie zur wirtschaftlichen Entwicklung der Region und zu Bildungsmaßnahmen beitragen. Als Ausgleich für die Flächen- und Wassernutzung in der argentinischen Provinz Jujuy seien beispielsweise von Minera Exar Ausgleichszahlungen an die jeweiligen Dörfer geleistet worden (Frankel und Whoriskey 2016).

Kurzfasit zu Lithium

Im Hinblick auf die fünf definierten Dimensionen der ethischen Aspekte sind beim Lithiumabbau besonders die Umweltauswirkungen, insbesondere die der hohen Wasserentnahme, sowie die damit zusammenhängenden Grundrechtsgefährdungen Themen, die vermutlich auch für die Zukunft herausfordernd sein werden. Die weiteren drei Dimensionen der Arbeitsbedingungen, der politischen Rahmenbedingungen und der gesellschaftlichen Beiträge erschienen anhand der Rechercheergebnisse im Vergleich zu den anderen betrachteten Rohstoffen weniger bedenklich.

9.2 Kobalt

Arbeitsbedingungen

In der DR Kongo wird Kobalt sowohl industriell als auch im (artisanalen) Kleinbergbau abgebaut. Nach Schätzungen von Amnesty International sind im Bergbau der DR Kongo zwischen 110.000 und 150.000 Menschen im artisanalen Sektor, d. h. unter Zuhilfenahme einfacher Werkzeuge, tätig (Scheele et al. 2016).

Diese artisanalen Abbauaktivitäten finden häufig auf Bergbauhalden – sowohl im Tagebau als auch unter Tage – statt und sind im Gegensatz zur industriellen Förderung durch Bergbauunternehmen nicht nur körperlich anstrengend,

sondern bergen auch entsprechend hohe Sicherheits- und Gesundheitsrisiken. Wie aus der Veröffentlichung der DERA hervorgeht (Al Barazi et al. 2017), ist der Anteil des artisanalen Bergbaus in der DR Kongo von ca. 40 % in den Jahren 2010 und 2011 gesunken und machte 2015 einen Anteil von knapp einem Viertel aus.

Die dem Erzabbau folgenden Veräußerungen und Geschäfte finden häufig inoffiziell statt oder werden nicht ausreichend dokumentiert. So kommt es zu Vermischungen von industriell gefördertem und aus Kleinbergbau stammendem Material. Dadurch gestalten sich quantitative Analyse und Transparenz in der Lieferkette schwierig (Al Barazi et al. 2017). Hieraus ergibt sich der Handlungsansatz für alle beteiligten Akteure, die Transparenz in der Lieferkette zu erhöhen. Denn nur wenn die Herkunft der Rohstoffe rückverfolgt werden kann, können ethisch vertretbare Bedingungen entlang der Rohstoffbeschaffungswege sichergestellt werden.

Durch mangelnden Arbeitsschutz beim Kobaltabbau entstehen viele gesundheitliche Probleme wie z. B. Erkrankungen der Atemwege und Hautleiden (Al Barazi et al. 2017). Laut Weltgesundheitsorganisation (WHO) und UN Globally Harmonized System of Classification and Labelling (UN GHS) wird Kobalt als möglicherweise bzw. wahrscheinlich karzinogen eingeordnet. Insbesondere die Inhalation von Kobaltstäuben gilt als besonders problematisch (Cobalt Institute 2017). Darüber hinaus weisen viele Kobalt-Kupfer-Erze aufgrund von Urangelhalten erhöhte natürliche Strahlenwerte auf, die die Arbeitsbedingungen bedenklich gestalten. Nach dem Feststellen von Radioaktivität in den Erzen der kongolesischen Kamoto-Mine wurde im Jahr 2018 dessen Verkauf bis voraussichtlich Ende 2019 eingestellt, während der Abbau weiterhin stattfindet. In diesem Zusammenhang ist eine Ionenaustauschanlage zur Entfernung des Urans geplant, die 2019 in Betrieb genommen werden soll (Home 2018; Biesheuvel 2018).

Die Diskussion um die Bezahlung der Arbeiter, deren Behandlung und Lebensmittel- sowie Gesundheitsversorgung wird immer wieder thematisiert (Scheele et al. 2016; Wilson 2018; industriALL 2016). Die Problematik um unzureichende Arbeitsbedingungen wurde in der Vergangenheit auch durch eine Vielzahl an Meldungen zu Unfällen mit Todesfolge offensichtlich (Radio Okapi 2014a, 2014b, 2015).

Umweltauswirkungen

Die räumliche Nähe der Kobaltabbaugebiete zu den Wohngebieten der lokalen Bevölkerung führt zu verschlechterten

Lebensbedingungen durch den Ausstoß und die Immission von Schadstoffen in Luft und Wasser bzw. Boden sowie durch Rauch und Lärm. Auch der Transport der Erze mittels LKW verursacht Belastungen mit negativen Einflüssen auf die Lebensbedingungen der dort lebenden Menschen. Mit dem Kobaltabbau im Südosten der DR Kongo geht eine hohe Entwaldungsrate einher, die nicht nur negative Effekte auf die Biodiversität, die Vegetation und die Luftqualität hat, sondern auch für die dortige Bevölkerung problematisch ist, da diese in enger Verbindung mit der Natur lebt und der Wald eine wichtige Lebensgrundlage darstellt. Zudem hat der Bergbau einen negativen Einfluss auf die Wasserqualität, da die Abwasserentsorgung über die Gewässer stattfindet und diese so als Trinkwasserquelle und Lebensraum für Fische, die eine weitere Nahrungsquelle darstellen, verloren gehen (Scheele et al. 2016).

Grundrechtsgefährdungen

An erster Stelle ist im Bereich der Grundrechtsgefährdungen die Problematik der Kinderarbeit zu nennen. Ein Amnesty-International-Bericht geht auf Basis von UNICEF-Schätzungen für 2014 davon aus, dass ca. 40.000 Kinder in kongolesischen Minen arbeiteten. Neben schweren und gefährlichen Arbeitsbedingungen betrage die tägliche Arbeitsdauer bis zu zwölf Stunden. Schulbesuche fänden entweder zusätzlich zur Arbeit oder gar nicht statt (Amnesty international 2016). Diese Gegebenheiten verletzen nicht nur mehrere essenzielle Kinderrechte, wie z. B. das Recht auf Bildung und den Schutz vor Ausbeutung. Ferner ist die Kinderarbeit ein Hinweis auf ungenutzte zukünftige Entwicklungsperspektiven des Landes.

Im Zusammenhang mit dem Kobaltabbau gibt es mehrere Grundrechtsverletzungen, insbesondere nicht gewährte Versammlungsrechte, um den Einfluss der Bergarbeiter und von Gewerkschaften zu begrenzen (Scheele et al. 2016). Auch Arbeitnehmerrechte, wie z. B. medizinische Betreuung und angemessene Entlohnung, gelten als häufig gefährdet (Wilson 2018).

Politische Rahmenbedingungen

Die DR Kongo, China, Kanada und Australien sind die vier größten Kobaltabbauländer und stellen gemeinsam ca. 75 % des weltweit geförderten Kobalts. Die DR Kongo hatte 2015 einen Anteil an der weltweiten Förderung von knapp 60 %. Der Zwischenhandel mit dem Erz und dessen Weiterverarbeitung wird weitgehend von Akteuren in China bestimmt (ZDF Mediathek 2018). Für alle betrachteten Indikatoren schneidet die DR Kongo innerhalb der letzten zehn Perzentile der relati-

	DR Kongo	China	Kanada	Australien
Förderung 2015	84.401 t	10.093 t	6.904 t	6.777 t
Mitspracherecht und Verantwortlichkeit	8,9	7,9	96,1	94,6
Politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt oder Terrorismus	3,8	36,7	88,6	77,6
Rechtsstaatlichkeit	3,9	44,7	95,7	93,3
Regulierungsqualität	5,3	48,6	97,6	98,1
Korruptionskontrolle	5,8	46,6	95,7	92,8
Wirksamkeit der Regierung	4,8	68,3	97,1	92,3

© World Bank 2017; Forderung aus DERA 2018

Tabelle 9-2: Politische Bedingungen – WGI der Weltbank für die Top-4-Kobaltabbauländer (Referenzjahr 2017)

ven Länderbewertung ab, was die bereits beschriebenen, schwierigen Umgebungsbedingungen unterstreicht und die Wichtigkeit entsprechender Verbesserungsmaßnahmen betont. Wie bereits für Lithium beschrieben, schneidet China hinsichtlich der meisten Weltbank-Indikatoren im Mittelfeld ab. Die Indikatorwerte für Kanada und Australien fallen alle in das obere Viertel der relativen Länderliste.

Wie bereits in Kapitel 6.2.1 erwähnt, hat die DR Kongo im Rahmen eines Regierungserlasses die Lizenzgebühren für den Kobaltabbau zunächst im Sommer 2018 von 2 % auf 3,5 % und Ende desselben Jahres schließlich auf 10 % erhöht. Der Rohstoff wurde von der DR Kongo in diesem Zuge als „strategische Substanz“ eingestuft (Werwitzke 2018). Die zukünftigen politischen Bedingungen in der DR Kongo können durch den im Dezember 2018 neu gewählten Präsidenten Tshisekedi bestimmt werden. Dieser hatte den vorangegangenen Präsidenten Kabila, der seit 2001 im Amt war, abgelöst (The Guardian 2019).

In der DR Kongo herrschen nach den beiden Kongokriegen nach wie vor bewaffnete Konflikte in einigen Landesteilen. Mit Bezug zum Rohstoffabbau waren davon in der Vergangenheit vor allen Dingen die östlichen Provinzen mit ihren Gold-, Zinn-, Tantal- und Wolframlagerstätten (sog. „Konfliktminera-

le“) betroffen und weniger die Kobaltlagerstätten im Süden des Landes. Nachgewiesenermaßen wurden durch den Abbau im Kleinbergbau und den Handel der Konfliktminerale bewaffnete Gruppen finanziert, was letztlich zum Erlass des Dodd-Frank Act in den USA und zur EU-Richtlinie zu den Sorgfaltspflichten beim Bezug dieser Rohstoffe führte. Allerdings scheint auch in den Kobaltabbaugebieten die Lage fragil zu sein und die Möglichkeit vorhanden, dass die Erlöse – insbesondere aus dem Kleinbergbau – zukünftig zur Finanzierung bewaffneter Konflikte beitragen könnten. Aktuell sind jedoch keine konkreten Anhaltspunkte diesbezüglich vorhanden (Al Barazi et al. 2017; Hornung 2018).

Gesellschaftliche Beiträge

Die Dimension der gesellschaftlichen Beiträge gestaltet sich für den Rohstoff Kobalt laut Amnesty International insofern schwierig, als die Lieferkette komplex und, wie bereits im Rahmen der Arbeitsbedingungen erläutert, recht intransparent ist (Amnesty International 2016). Die Unternehmen berichten durchaus von gesellschaftlichen Beiträgen, wie z. B. regionalen Unterstützungszahlungen oder dem Bau medizinischer Einrichtungen (Scheele et al. 2016; ITIE 2015). Wie in Abschnitt 9.7 ausgeführt wird, existieren viele Initiativen, um die komplexe Lieferkette transparenter zu erfassen und die Bedingungen, unter denen Kobalt abgebaut wird, verbessern zu können.

Kurzfasit zu Kobalt

Die Betrachtung der ethischen Aspekte der Kobaltgewinnung ergibt auf Basis der Recherche in Summe ein besorgniserregendes Bild. Die allgemeinen Arbeitsbedingungen sowie im Speziellen die des artisanalen Bergbaus, die teilweise dadurch bedingten Grundrechtsverletzungen, insbesondere durch Kinderarbeit, sowie die durch den Abbau verursachten negativen Umweltauswirkungen in der DR Kongo, dem mit Abstand wichtigsten Förderland, sind zentrale ethische Aspekte. Die politischen Rahmenbedingungen des Landes erschweren hierbei die Situation. Kapitel 9.7 zeigt erste Lösungsansätze, um die ethischen Aspekte entlang der Lieferkette zu adressieren.

9.3 Nickel

Arbeitsbedingungen

Der Nickelabbau birgt generell gewisse gesundheitliche Risiken: So können Emissionen aus den Abbauaktivitäten ohne ausreichenden Schutz beispielsweise zu Erkrankungen der Atemwege führen, die wiederum die Ursache für langfristige Probleme wie z. B. Asthma, Lungen- und Herzkrankheiten sein können. Es wird darüber hinaus auch eine kanzerogene Wirkung durch die Belastungen vermutet (Grimsrud et al. 2002; Müller und Reckordt 2017).

Während über positive Arbeitsbedingungen für die kanadische Nickelmine Voisey's Bay berichtet wird (Barker 2018), gestalten diese sich in Russland eher schwierig. Laut einem Artikel des Online-Nachrichtendienstes EcoWatch besteht im Gebiet um die russische Stadt Norilsk, wo mehrere Raffinerien betrieben werden, eine zehn Jahre geringere Lebenserwartung, ein verdoppeltes Krebsrisiko sowie eine stärkere Verbreitung von Atemwegserkrankungen. Unternehmensberichten zufolge werden Gesundheit und Sicherheit am Arbeitsplatz aktiv verbessert, so dass im Jahr 2017 die Zahlen der Arbeitsunfälle sowie daraus resultierender Todesfälle jeweils halbiert wurden (Norilsk Nickel 2018; Foy 2018).

Umweltauswirkungen

Beim Nickelabbau kommt es häufig zu negativen Umweltauswirkungen. Die Stadt Norilsk, in deren Umgebung eine Vielzahl an Metallen gewonnen wird, zählt laut einem Artikel der Zeitung The Guardian unter Berufung auf die Nichtregierungsorganisation Pure Earth zu den zehn meistverschmutzten Orten der Welt (Luhn 2016). Im September 2016 erregte der durch die Stadt fließende Daldykan-Fluss Aufsehen, da ein Filtrationsdamm durch schwere Regengüsse brach und sich

der Fluss dadurch blutrot färbte. Zwei Jahre zuvor verursachten ähnliche Aktivitäten die Kontamination des finnischen Kokemäki-Flusses mit Kobalt, Kupfer, Blei und Cadmium. Laut Unternehmensaussagen wird das Thema Umweltverantwortung seit 2005 mit strategischer Priorität vorangetrieben (Zukowski 2016).

Ein in der Zeitschrift südostasien veröffentlichter Artikel über die philippinische Umweltministerin Lopez berichtet darüber, dass die frühere Umweltaktivistin während ihrer zehnmonatigen Amtszeit die inländischen Nickelminen prüfte und die Schließung von 21 Nickelminen des Landes anordnete, was u. a. mit den dadurch verursachten Umweltbelastungen begründet wurde (Reckordt 2016).

Eine Publikation des philippinenbüro e.V. kommt zu dem Schluss, dass die indonesische Insel Palawan starke Umweltbeeinträchtigungen aufgrund des Nickelabbaus aufweise. Die Freisetzung saurer Grubengewässer verursache einen Rückgang der Boden- und Wasserqualität sowie der Biodiversität. Dies führe z. B. zu Fischsterben, was den Verlust dieser Nahrungsquelle bedeute (Müller und Reckordt 2017). Weitere Darstellungen berichten über Kampagnen für den Erhalt des UNESCO-Schutzgebietes sowie gegen den Bergbau auf der Insel Palawan (Reckordt 2016).

Grundrechtsgefährdungen

Die im Nickelabbau tätigen internationalen Unternehmen setzen sich laut eigenen Angaben aktiv im Bereich sozialer Initiativen ein, u. a. durch die Teilnahme am United Nations Global Compact (Nornickel 2019; Vale 2018b).

philippinenbüro e.V. berichtet im Zusammenhang mit dem Nickelabbau im Land jedoch von mehreren Menschenrechtsverletzungen. Dies betrifft die Verunreinigung von Trinkwasser sowie die erzwungene Umsiedlung von Gemeinden. Wie zuvor bereits erwähnt, ordnete die philippinische Regierung im Jahr 2017 als Ergebnis einer umfassenden Prüfung die Schließung mehrerer Minen an, da der Abbau sowohl Umwelt- als auch Menschenrechtsstandards nicht erfüllte (Müller und Reckordt 2017). Die Entscheidung ist umstritten, so dass eine vollumfängliche und dauerhafte Umsetzung der Beschlüsse fragwürdig erscheint. Die aktuellen Angaben der USGS zeigen für den Nickelabbau auf den Philippinen einen entsprechenden Rückgang der Förderung von 347.000 t im Jahr 2016 auf 230.000 t im Jahr 2017, wobei letztere Zahl lediglich einen Schätzwert der USGS repräsentiert (USGS 2018a).

	Philippinen	Russische Föd.	Kanada	Australien
Förderung 2015	481.292 t	261.000 t	234.519 t	229.381 t
Mitspracherecht und Verantwortlichkeit	48,8	18,7	96,1	94,6
Politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt oder Terrorismus	11,0	21,4	88,6	77,6
Rechtsstaatlichkeit	37,0	22,1	95,7	93,3
Regulierungsqualität	55,8	32,7	97,6	98,1
Korruptionskontrolle	39,9	17,3	95,7	92,8
Wirksamkeit der Regierung	51,9	50,5	97,1	92,3

© World Bank 2017; Förderung aus DEFA 2018

Tabelle 9-3: Politische Bedingungen – WGI der Weltbank für die Top-4-Nickelabbauländer (Referenzjahr 2017)

Politische Rahmenbedingungen

Die vier wichtigsten Nickelförderländer sind die Philippinen, Russland, Kanada und Australien. Während Kanada und Australien, wie zuvor bereits beschrieben, bezüglich aller Indikatoren zu ihren politischen Rahmenbedingungen im oberen Teil des Weltbank-Rankings geführt werden, gibt es bezüglich der Philippinen und Russland vier bzw. fünf Indikatoren, die in der unteren Hälfte platziert sind (Tabelle 9-3). Für die Philippinen tritt hierbei insbesondere die Bewertung hinsichtlich „Politischer Stabilität und Abwesenheit von Gewalt oder Terrorismus“ hervor.

Gesellschaftliche Beiträge

Die Recherche zu den gesellschaftlichen Beiträgen von den in der Nickelbereitstellung aktiven Unternehmen ergab einige soziale Aktivitäten, z. B. bezüglich Schul- und Sportprojekten (BHP 2017; Vale 2018a; Norilsk Nickel 2017). Jedoch wurden keine weiteren Quellen zur Einschätzung oder Bestätigung dieser Publikationen gefunden. Der Publikation von philippinenbüro e.V. zufolge gibt es eine Diskussion über die Höhe der finanziellen Beiträge der Bergbauaktivitäten im Land (Müller und Reckordt 2017). Die philippinische Tageszeitung Philstar berichtet, dass die von der Umweltministerin Lopez angeordnete staatliche Prüfung der philippinischen Minen zu dem Ergebnis kam, dass 18 % der mit den Bergbauaktivitäten erzielten Gewinne an die ortsansässigen Gemeinschaften fließen (Morallo 2017).

Kurzfasit zu Nickel

Auf Basis der Recherche zu den ethischen Aspekten fallen insbesondere die mit der Nickelförderung einhergehenden Gesundheits- und Umweltbelastungen auf. Diese werden nicht nur durch die angewandte Abbaupraxis bestimmt, sondern sind auch durch Unfälle und Zwischenfälle mit weitreichenden Folgen für die Natur und die menschliche Gesundheit gekennzeichnet. Diese Umstände scheinen den entsprechenden Unternehmen und auch der Politik durchaus bewusst zu sein, woraus sich entsprechende Maßnahmen der genannten Akteure ableiten.

9.4 Platin

Arbeitsbedingungen

Ein Report des deutschen Hilfswerks Brot für die Welt berichtet von negativen Arbeitsbedingungen im südafrikanischen Platinabbau. So sei die Bezahlung niedrig, Sicherheitsvorkehrungen, wie z. B. Brandschutzanforderungen, seien ungenügend und die Arbeit berge gesundheitliche Gefahren (Bahadur et al. 2017). Neben den Arbeitsbedingungen im Bergbau spielen auch die generellen sozioökonomischen Spannungen in Südafrika eine wichtige Rolle (BMZ 2019). Die internationale Nachrichtenagentur Reuters berichtet von über 400 Vorfällen sozialer Unruhen im Zeitraum Januar 2016 bis April 2018 mit

Einfluss auf die Abbauproduktion im Ostteil der Platinförderregion Südafrikas (Stoddard 2018). Des Weiteren stellt das „Massaker in Marikana“ aus dem Jahr 2012 ein äußerst trauriges Ereignis dar. Als Folge eines Streiks im Jahr 2012 kam es zu gewaltsamen Auseinandersetzungen, bei denen u. a. 34 Minenarbeiter in einer Eskalation durch die Polizei getötet und knapp 80 verletzt wurden. Auch hier waren Forderungen nach höherer Entlohnung und besseren Arbeitsbedingungen die Gründe des Streiks. Seither seien die Löhne zwar angehoben und zusammen mit allen Beteiligten ausgehandelt worden, der Bericht weist aber auch auf die hohe Inflationsrate von 5–6 % hin, so dass die Lohnerhöhungen inflationsbereinigt nur gering ausfallen (Bahadur et al. 2017; IPA 2017).

Umweltauswirkungen

Der „Brot für die Welt“-Bericht beschreibt mehrere negative ökologische Auswirkungen des Platinabbaus in Form von Luftverschmutzungen durch Staub und Schwefeldioxid in Südafrika. Die Grenzwerte für Letztere seien seit 2004 ohne bekannte Erklärungen seitens der Regierung angehoben worden. Weiterhin hätten Prozesse zur Schwefeldioxidbindung zur Verunreinigung von Böden und Trinkwasser mit Calciumsulfat geführt (Bahadur et al. 2017).

Grundrechtsgefährdungen

Vor dem Hintergrund der generellen sozioökonomischen Schwierigkeiten weist auch das staatliche Bildungssystem Südafrikas erhebliche Herausforderungen auf. So haben nur 31 % der über 20-Jährigen der Bevölkerung in Rustenberg einen Abschluss einer weiterführenden Schule. 5,4 % der gleichen Gruppe haben offenbar gar keine Schulausbildung genossen. Untersuchungen der Wirtschaftsberatung Eunomix stellen dies in den Zusammenhang mit der hohen Beschäftigungsrate im Bergbausektor, die wiederum einen signifikanten Pull-Effekt auf dem Arbeitsmarkt bewirkt. Diese arbeitsbedingte Migration löste im Land einen Wohnraumangel aus, der mit ca. 59.000 Wohnungen beziffert wird und zu einem hohen Anteil von 45 % an informellen Wohnformen führt (Eunomix 2016).

Politische Rahmenbedingungen

Die vier größten Platinabbauländer der Welt sind Südafrika, Russland, Simbabwe und Kanada; in Summe repräsentierten sie mehr als 95 % des weltweiten Platinabbaus 2015, wobei in Südafrika 73 % der weltweiten Förderung im Jahr 2015 stattfand. Die politischen Rahmenbedingungen, die anhand der World Governance Indicators dargestellt werden, ergeben ein gemischtes Bild. Südafrika wird hinsichtlich „Politischer Stabili-

	Südafrika	Russische Föd.	Simbabwe	Kanada
Förderung 2015	138 t	24 t	12 t	6 t
Mitspracherecht und Verantwortlichkeit	69,0	18,7	14,8	96,1
Politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt oder Terrorismus	35,7	21,4	18,1	88,6
Rechtsstaatlichkeit	52,4	22,1	7,7	95,7
Regulierungsqualität	62,5	32,7	3,9	97,6
Korruptionskontrolle	56,7	17,3	9,6	95,7
Wirksamkeit der Regierung	65,4	50,5	11,5	97,1

Tabelle 9-4: Politische Bedingungen – WGI der Weltbank für die Top-4-Platinabbauländer (Referenzjahr 2017)

© World Bank 2017; Förderung aus Schmidt 2015

	China	Australien	USA	Russische Föd.
Förderung 2015	105.000 t	8.799 t	5.900 t	2.800 t
Mitspracherecht und Verantwortlichkeit	7,9	94,6	82,3	18,7
Politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt oder Terrorismus	36,7	77,6	59,1	21,4
Rechtsstaatlichkeit	44,7	93,3	91,8	22,1
Regulierungsqualität	48,6	98,1	92,8	32,7
Korruptionskontrolle	46,6	92,8	88,9	17,3
Wirksamkeit der Regierung	68,3	92,3	92,8	50,5

© World Bank 2017; Förderung aus DERA 2018

Tabelle 9-5: Politische Bedingungen – WGI der Weltbank für die Top-4-Seltenerdmetall-Abbauländer (Referenzjahr 2017)

tät und Abwesenheit von Gewalt oder Terrorismus“ in der unteren Hälfte des Länderrankings geführt. Bezüglich aller anderen betrachteten Indikatoren hingegen liegt Südafrika in der oberen Hälfte. Kanada bewegt sich bezüglich aller Indikatoren im oberen Viertel des Weltbank-Rankings, wohingegen vier bzw. sechs Indikatoren von Russland und Simbabwe im unteren Viertel des Rankings liegen.

Gesellschaftliche Beiträge

Laut Angaben der Eunomix-Studie ist der Bergbau- und Raffinadesektor in Südafrika der größte Beitragszahler sozialer Unternehmensinvestitionen und deshalb auch der größte Stellhebel für die sozioökonomische Weiterentwicklung des Landes. So investierten drei Bergbauunternehmen im Jahr 2013 in Summe 43 Mio. ZAR (umgerechnet ca. 2,7 Mio. €) in das Bildungssystem und 171 Mio. ZAR (umgerechnet ca. 10,9 Mio. €) in das Gesundheitswesen des Landes. Jedoch besteht eine Diskussion darüber, inwiefern alle geplanten Maßnahmen implementiert wurden (Eunomix 2016).

Die Eunomix-Studie stellt die Vermutung auf, dass die positiven Effekte solcher gesellschaftlichen Beiträge dadurch geschmälert werden, dass die verschiedenen sozioökonomischen Probleme des Landes in wechselseitiger Abhängigkeit stehen und nur gemeinsam gelöst werden können (Eunomix 2016).

Kurzfasit zu Platin

Die ethischen Aspekte der Platingewinnung spiegeln die schwierige sozioökonomische Lage des Hauptförderlands Südafrika wider. Vor diesem Hintergrund sind die Arbeitsbedingungen, insbesondere die Entlohnung und die Arbeitssicherheit sowie die allgemeinen Lebensbedingungen, wie beispielsweise die Wohnsituation, zentrale ethische Aspekte in Verbindung mit der Platinbereitstellung. Auch die von den Förderaktivitäten ausgehende Umweltbelastung mit den Auswirkungen auf den Menschen sind wichtige zu betrachtende Themen. In dieser komplexen gesellschaftlichen Situation spielt Bildung eine zentrale Rolle, hier bieten sich neben der Verbesserung der Gesundheitsversorgung effektive Ansatzpunkte für gesellschaftliche Beiträge.

9.5 Seltenerdmetalle

Arbeitsbedingungen

Aufgrund der nur sehr geringen Datenlage ergab die Recherche zu den Arbeitsbedingungen des Seltenerdabbaus und bei der Gewinnung der Metalle keinerlei konkrete Informationen. Allerdings gilt es zu beachten, dass Seltenerdminerale unterschiedliche Mengen an Uran und insbesondere Thorium enthalten und somit unterschiedlich stark radioaktiv sind. Dies birgt nicht nur eine potenzielle Gefahr für die Menschen wäh-

rend des Abbaus der Erze und bei der Weiterverarbeitung, sondern auch für die Umwelt, wie nachfolgend ausgeführt wird (Marscheider-Weidemann et al. 2016).

Umweltauswirkungen

Die Recherche zu den Umweltauswirkungen des Abbaus und der Gewinnung der Seltenerdmetalle ergab einige bedenkliche Anhaltspunkte. Ein Artikel der britischen Zeitung The Guardian sowie ein Artikel des CNET-Magazins kamen zu dem Schluss, dass der Abbau der Seltenerdmetalle und deren Gewinnung mit großen negativen Umwelteffekten einhergehen. Beide Artikel berichten von einem See in der Inneren Mongolei, der aus radioaktiven Nebenprodukten der Seltenerdmetallgewinnung bestehe. Laut staatlichen Medienberichten und Anwohnern sei das Gewässer nicht fachgemäß abgedichtet und gefährde das Grundwasser sowie den nahegelegenen Yellow River, der für den Großteil Nordchinas als Trinkwasserquelle diene (Greene 2019; Kaiman 2014).

Laut The Guardian sei die Bevölkerungszahl in dieser Region innerhalb der letzten zehn Jahre von 2.000 auf 300 zurückgegangen sowie die Krebsrate angestiegen. Untersuchungen der lokalen Umweltschutzbehörde hätten ergeben, dass der Seltenerdmetallabbau und die damit verbundenen negativen Umweltauswirkungen durch die Fabriken die Ursache der Probleme sei (Bontron 2012).

Die chinesische Regierung ist bestrebt, die negativen Umweltauswirkungen der Förderung von Seltenerdmetallen zu reduzieren. Wie bereits in Kapitel 6.5.1 beschrieben, führte die chinesische Regierung im Jahr 2006 Exportbeschränkungen, Steuererhöhungen sowie weitere Beschränkungen ein und verschärfte diese insbesondere im Jahr 2010 (Reuters 2010b). Die Maßnahmen wurden jedoch letztlich von der Welthandelsorganisation als unzulässig erklärt (WTO 2015). In den Jahren 2012 und 2013 strebte die chinesische Regierung die Reduktion der Umweltauswirkungen an, indem z. B. gegen illegale Minen vorgegangen, Raffinerien geschlossen und Umweltauflagen erteilt wurden (Bradsher 2012, 2013).

Grundrechtsgefährdungen

Auf Basis der Informationen des bereits erwähnten Guardian-Artikels stellen sowohl der Abbau als auch die Gewinnung der Seltenerdmetalle eine potenzielle Gefährdung der Rechte auf sauberes Trinkwasser und Gesundheit der Menschen in China dar (Kaiman 2014). Die Recherche ergab vor dem Hintergrund der dünnen Informationsbasis sonst keine konkreten Anhaltspunkte für weitere Grundrechtsgefährdungen, die

explizit mit der Bereitstellung von Seltenerdmetallen in Verbindung stehen.

Politische Rahmenbedingungen

Der Abbau der Seltenerdmetalle wird maßgeblich von China bestimmt, das im Jahr 2015 einen Anteil von knapp 84 % an den globalen Abbauaktivitäten hatte. Mit wesentlich geringeren Anteilen an der Weltförderung sind Australien, die USA sowie Russland vertreten, wie in Tabelle 9-5 zu sehen. Alle vier Länder waren 2015 für mehr als 97 % des weltweiten Abbaus von Seltenerdmetallen verantwortlich. Während nahezu alle Indikatorwerte für Australien und die USA im oberen Viertel des Länderrankings liegen, liegen fünf der Indikatorwerte für China in der unteren Hälfte. Insbesondere die Kategorie „Mitspracherecht und Verantwortung“ weist einen sehr geringen Wert auf.

Gesellschaftliche Beiträge

Im Rahmen des Seltenerdmetallabbaus ergab die Recherche keine Beiträge.

Kurzfasit zu Seltenerdmetallen

Die Recherche zu den ethischen Aspekten im Zusammenhang mit der Förderung von Seltenerdmetallen, die maßgeblich in China stattfindet, gestaltet sich angesichts der geringen Datenverfügbarkeit als sehr schwierig. Laut Medienberichten dürfte sich allerdings die Förderung und Gewinnung der Seltenerdmetalle, insbesondere aufgrund der potenziellen radioaktiven Belastung durch Uran und Thorium, hinsichtlich der Arbeitsbedingungen und Umweltauswirkungen problematisch gestalten. Die Recherche ergab ansonsten keinerlei konkrete Informationen zu Grundrechtsverletzungen, die in direkter Verbindung mit dem Abbau der Seltenerdmetalle steht, oder zu positiven gesellschaftlichen Beiträgen.

9.6 Kupfer

Arbeitsbedingungen

Ein umfassender Artikel der Zeitung The Economist aus dem Jahr 2013 berichtet über den Kupferbergbau in Chile, dass die Arbeitsbedingungen aus Sicht der Bergarbeiter zufriedenstellend seien (Antofagasta 2013). Dennoch kommt es immer wieder zu Unglücken, insbesondere bei der Untertageförderung von Kupfer. So fand beispielsweise das Grubenunglück von San José im Jahr 2010, bei dem 33 Bergleute in 700 m Tiefe für 69 Tage eingeschlossen waren und schließlich befreit werden konnten, intensive mediale Beachtung (Kemper 2010; Süddeutsche Zeitung 2013). Auch in Europa kommt es insbesondere im Untertagebau immer wieder zu Unglücken, auch mit Todesfällen (Welt 2019; mdr.de 2016).

Über den Kupferabbau in Indonesien sowie im Speziellen über die Grasberg-Mine, die die drittgrößte Kupfermine der Welt ist, gibt es Meldungen, die von mangelnden Sicherheitsvorkehrungen und einem dadurch bedingten Bergwerkunfall im Jahr 2013 berichten, bei dem 28 Menschen ums Leben kamen (orf.at 2014). Eine umfassende Studie, die in Zusammenarbeit von Misereor, Brot für die Welt sowie dem Global Policy Forum Europe erstellt wurde, berichtet von regionalen Konflikten um den Bergbau sowie den Arbeitsbedingungen im Kupferbergbau und in der anschließenden Produktion, die gesundheitliche Gefahren durch Emissionen bergen. Diese sollten durch entsprechende Schutzmaßnahmen adressiert werden. Der Bericht führt nur das Beispiel Sambia an, wo ebendies nicht der Fall ist.

Umweltauswirkungen

Die Recherche zu den durch den Kupferbergbau verursachten Umweltauswirkungen ergab insgesamt ein eher bedenkliches Bild. Auf der einen Seite sind in Chile durchaus positive Entwicklungen zu erkennen, wie z. B. wasserkraftbasierte Energieversorgung der Minen und die Schonung der örtlichen Grundwasserspiegel (Antofagasta 2013). Chile plant zudem, seine Minenaktivität bis 2035 auf Basis der Alta Ley Roadmap – einer staatlich-privaten Initiative – zunehmend umwelt- und sozialverträglicher zu gestalten und den Ausbau erneuerbarer Energiequellen voranzutreiben (Alta Ley 2018). So soll der Energiebedarf der chilenischen Minen zukünftig zu großen Teilen aus regenerativ erzeugtem Solarstrom bezogen werden (BMU 2018). Konträr dazu wird jedoch für Indonesien, Sambia und Peru von negativen Umweltauswirkungen berichtet.

So würden in der indonesischen Grasberg-Mine täglich bis zu 230.000 t Abraum aus dem Erzabbau in einen Fluss geleitet (MMSD 2002; BBC 2008). Dadurch wurde das Flusssystem deutlich verändert und u. a. einer indigenen Bevölkerungsgruppe der Fischfang als Lebensgrundlage entzogen (Kerkow et al. 2012; Bochove und Stringer 2018).

Die 2012 veröffentlichte Studie von Misereor, Brot für die Welt und dem Global Policy Forum Europe berichtet über die Mopani-Mine in Sambia, dass dort signifikante Mengen an Schwefeldioxid sowie Arsen und Blei emittiert würden, was negative Folgen für Böden, Trinkwasserquellen und die Luftqualität sowie die dort lebenden Menschen habe (Kerkow et al. 2012; Bochove und Stringer 2018). Ein aktuellerer Bericht stellt infrage, ob die Emissionsgrenzwerte für Schwefeldioxid eingehalten werden (Gehring 2019).

Auch hinsichtlich des Kupferbergbaus in Peru wird von erheblichen Umweltbelastungen berichtet. So wurden im Jahr 2011 anhand von Wasserproben stark erhöhte Schwermetallkonzentrationen jenseits der peruanischen Höchstwerte festgestellt, die eine Gefahr für die Gesundheit von Menschen und Tieren darstellen (Kerkow et al. 2012).

Grundrechtsgefährdungen

Die Recherche ergab lediglich Berichte über Grundrechtsgefährdungen in Indonesien. So berichtet ein Bloomberg-Artikel über Menschenrechtsverletzungen im Umfeld der Grasberg-Mine, wie z. B. der Zerstörung der Lebensgrundlagen von Bevölkerungsgruppen (Bochove und Stringer 2018; Kerkow et al. 2012). Das Abbaugelände dieser Mine ist eine konfliktreiche Region, in der Rebellen für ihre Unabhängigkeit von Indonesien kämpfen. Dies kann auch zu einer Militarisierung und infolgedessen zu Rechtsverletzungen, beispielsweise gegen Bergbaueegner, führen. Auch über Gewalt gegen Gewerkschafter und protestierende Arbeiter wird berichtet (Kerkow et al. 2012).

Politische Rahmenbedingungen

Die Förderung von Kupfer ist im Vergleich zu den anderen betrachteten Rohstoffen polypolistisch verteilt, d. h., es gibt die Fördermenge betreffend kein besonders stark dominierendes Land, auch wenn Chile die größte Menge an Kupfer fördert. In Tabelle 9-6 sind die acht größten Kupferabbauländer der Welt auf Basis des Jahres 2015 zu sehen. Diese acht Länder machen am weltweiten Kupferabbau einen Anteil von knapp 77 % aus. Die Länder sind Chile, China, Peru, die USA, Australien, die DR Kongo, Sambia und Russland. Chile war

2015 für knapp 32 % des weltweiten Abbaus verantwortlich und erzielte im Ranking der Weltbank, ebenso wie die USA und Australien, in allen Indikatoren einen Wert in der oberen Hälfte.

Gesellschaftliche Beiträge

Die Recherche zu den gesellschaftlichen Beiträgen der Kupferbergbauindustrie ergab sowohl positive als auch negative Anhaltspunkte. Dies geht mit der Meinung des Artikels in The Economist über den chilenischen Kupferbergbau einher, der darin gleichermaßen eine Bereicherung und zugleich eine große Unsicherheit für das Land sieht (Antofagasta 2013).

Es ist zu erwähnen, dass die Unternehmen durchaus gesellschaftliche Beiträge, z. B. in Form von Bildungsangeboten, dem Bau von Infrastruktur, medizinischer Versorgung und kommunalen Entwicklungsprojekten, in Chile und Indonesien leisten (Codelco 2018; Bochove und Stringer 2018).

Dem entgegen stehen kritische Berichte, die z. B. infrage stellen, ob die in Sambia tätigen Bergbauunternehmen ihren Steuerzahlungen nachkommen, und erörtern, inwiefern die Unternehmen Einfluss auf die staatliche Regierung und Behörden nehmen (Kerkow et al. 2012).

Kurzfasit zu Kupfer

Insgesamt ergibt sich aus der Recherche der verschiedenen ethischen Dimensionen der Förderung von Kupfer ein vielschichtiges Bild. Da viele Länder für die Förderung und die Bereitstellung von Kupfer relevant sind, variiert auch die Bedeutung ethischer Aspekte in Verbindung mit dem entsprechenden Kupferabbau in ebendiesen. Allerdings kann festgehalten werden, dass aus dem Kupferabbau erhebliche Umweltbelastungen resultieren können, die durch entsprechende Vorkehrungen vermindert werden müssen, um keine Gefahr für die menschliche Gesundheit und die Umwelt darzustellen. Des Weiteren gehen insbesondere vom Untertagebau Arbeitsgefahren für die Minenarbeiter aus. Auch der Umgang mit indigenen Bevölkerungsgruppen und Bergbauegnern können wichtige Themen mit einer Gefahr für Grundrechtsverletzungen darstellen.

	Chile	China	Peru	USA	Australien	DR Kongo	Sambia	Russische Föd.
Förderung 2015	5.772 t	1.712 t	1.701 t	1.439 t	996 t	906 t	719 t	700 t
Mitspracherecht und Verantwortlichkeit	79,3	7,9	55,2	82,3	94,6	8,9	36,0	18,7
Politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt oder Terrorismus	61,0	36,7	36,2	59,1	77,6	3,8	50,5	21,4
Rechtsstaatlichkeit	81,7	44,7	33,2	91,8	93,3	3,9	41,4	22,1
Regulierungsqualität	88,9	48,6	67,3	92,8	98,1	5,3	33,7	32,7
Korruptionskontrolle	82,2	46,6	38,9	88,9	92,8	5,8	35,6	17,3
Wirksamkeit der Regierung	77,9	68,3	48,6	92,8	92,3	4,8	28,9	50,5

Tabelle 9-6: Politische Bedingungen – WGI der Weltbank für Top-8-Kupferabbauländer (Referenzjahr 2017)

© World Bank 2017, Förderung aus DEFA 2018

9.7 Initiativen verschiedener Interessenvertreter

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Umstände beleuchtet, unter denen die Rohstoffe abgebaut werden. Ebenso wurden auch Bestrebungen seitens der Unternehmen sowie von staatlicher Seite aufgezeigt, um durch gesellschaftliche Beiträge die ethisch bedenklichen Aspekte in Verbindung mit einzelnen Rohstoffen zu verbessern. Ziel dieses Abschnitts ist es nun, weitergehende Aktivitäten von verschiedenen Interessenvertretern sowie insbesondere von verschiedenen Initiativen zu untersuchen. Die Herangehensweise sieht vor, zunächst verschiedene Aktivitäten von Initiativen darzustellen und diese dann den Herausforderungen bzgl. der sechs als kritisch identifizierten Materialien gegenüberzustellen. Tabelle 9-7 zeigt eine Übersicht über die wichtigsten Rohstoffinitiativen sowie zu einigen relevanten gesetzlichen Rahmenbedingungen oder weiteren Engagements.

Initiative	Relevante Rohstoffe	EoL Recycling Rate
Responsible Cobalt Initiative	Kobalt	33 Mitglieder (BMW, Daimler, BASF, Samsung SDI, Samsung Electronics u. a.)
Responsible Minerals Initiative	Tantal, Zinn, Wolfram, Gold, Kobalt („Konfliktminerale“)	BMW, Daimler, Ford, General Motors, Honda, Toyota, Volvo Group, Volvo Car Corporation, VW u. a.
Responsible Steel Initiative	Stahl	BMW, Daimler u. a.
Aluminium Stewardship Initiative	Aluminium	Audi, BMW, Daimler, Jaguar, Land Rover, WWF u. a.
Drive Sustainability	37 für die Automobilindustrie wichtige Rohstoffe	BMW, Daimler, Ford, Honda, Jaguar, Land Rover, Scania, Toyota, Volvo Group, Volvo Car Corporation, VW u. a.
Initiative for Responsible Mining Assurance	Alle Rohstoffe aus Bergbau	Oxfam America, Sustainable Purchasing Leadership Council, Jewelers of America
International Council on Mining and Minerals	Alle	Anglo American, Antofagasta Minerals, BHP, Codelco, Freeport-McMoRan, Glencore, Lonmin, Rio Tinto, Vale, Cobalt Institute, Nickel Institute u. a.
Human Rights Respect System	Alle	Daimler
Pilotprojekt in der DR Kongo	Kobalt aus Kleinbergbau	BASF, BMW, Samsung Electronics, Samsung SDI, GIZ
Zusammenschluss zur Entwicklung nachhaltiger Batteriesysteme (kein offizieller Name verfügbar)	Alle für Batteriesysteme relevanten Rohstoffe	BMW, Northvolt, Umicore
Responsible Copper Initiative	Kupfer	BMW, Codelco
Initiative Nationaler Aktionsplan „Wirtschaft und Menschenrechte“	Alle	Dt. Staat, Unternehmen, Zivilgesellschaft, Gewerkschaften
Verordnung (EU) 2017/821		
OECD-Leitsätze für die Erfüllung der Sorgfaltspflicht	Zinn, Tantal, Wolfram, deren Erze und Gold	
Dodd-Frank Act (US-Gesetz)	„Konfliktminerale“ aus DR Kongo und ihren Nachbarstaaten	
Projekte der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	Alle, mit Fokus auf „Konfliktminerale“	

© BMW Group 2018a, 2018b, 2018c, Automobilwoche 2018, Drive Sustainability 2018b, Daimler AG 2018b, Responsible Minerals Initiative 2019, Responsible Steel 2019, ASI 2019, IRMA 2019, Auswärtiges Amt 2017, BDI 2013, BGR 2018a, 2019b, 2019c, ICMM 2019

Tabelle 9-7: Übersicht zu Rohstoffinitiativen

Initiativen stellen ein beliebtes Instrument der OEM dar, um gemeinsam mit weiteren relevanten Akteuren die Transparenz in der Lieferkette zu erhöhen und gemeinsam auf Verbesserungen hinzuwirken. So gab beispielsweise der Daimler-Konzern im Jahr 2018 bekannt, dass er die Transparenz in seinen Rohstofflieferketten mit dem Beitritt zu vier Rohstoffinitiativen erhöhen möchte. Diese sind die Responsible Cobalt Initiative, die Responsible Minerals Initiative, die Responsible Steel Initiative sowie die Aluminium Stewardship Initiative. Zweck dieser Beitritte ist das Erlangen zertifizierbarer Standards und einer erhöhten Transparenz bei der Beschaffung, um mehr Verantwortung zu übernehmen und die Bedingungen an den Abbauorten zu verbessern. Der Fokus liegt laut Unternehmensangaben zunächst auf Kobalt, Stahl und Aluminium; zu einem späterem Zeitpunkt sind auch Aktivitäten zu Lithium, Nickel, Kupfer und Mangan angedacht (Automobilwoche 2018).

Der seit 2016 existierenden Responsible Cobalt Initiative gehören verschiedene Unternehmen, insbesondere auch OEM, weitere Organisationen sowie die kongolesische Regierung und die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) an. Die Initiative zählte im Juni 2018 33 Mitglieder und wurde 2016 von der chinesischen Handelskammer für Metall-, Mineralien- sowie Chemikalien-Im- und Exporteure (CCCMC) ins Leben gerufen. Weitere ausgewiesene Ziele der Responsible Cobalt Initiative sind u. a. die Entwicklung von Maßnahmen, um sozialen und ökologischen Risiken sowie dem Einsatz von Kinderarbeit beim Kobaltabbau entgegenzutreten sowie eine Erhöhung der Transparenz und Governance in der Lieferkette herbeizuführen (Daimler AG 2018a). In diesem Rahmen wird aktuell gemeinsam mit CCCMC und der Responsible Minerals Initiative ein Kobalt-Audit-System entwickelt (Powder Metallurgy Review 2017).

Die Initiative Drive Sustainability, der inzwischen zehn europäische Automobilhersteller angehören, wurde Anfang 2017 als Ergebnis einer fünfjährigen Arbeitsgruppe der Automobillieferkette gegründet. Inzwischen zählen BMW, Daimler, Ford, Honda, Jaguar, Land Rover, Scania, die Volvo Group sowie die Volvo Car Corporation, VW und Toyota zu ihren Mitgliedern. Darüber hinaus sind Automobilzulieferer, Nichtregierungsorganisationen sowie EU-Institutionen an der Konzeptentwicklung beteiligt. Im Fokus stehen vor allem Aspekte der sozialen und ökologischen Nachhaltigkeit und erklärtes Ziel ist es, diese entlang der gesamten Automobillieferkette voranzutreiben (Drive Sustainability 2018a). Im Zuge dessen wurden diverse Richtlinien entwickelt, die die Verantwortlich-

keiten der Zulieferunternehmen bezüglich Themen wie Geschäftsethik, Arbeitsbedingungen, Menschenrechte und Umweltschutz festlegen und damit zur konzernübergreifenden Vereinheitlichung dieser Anforderungen beitragen. Eine wichtige Säule der Initiative stellt die Entwicklung von Werkzeugen und Hilfsmitteln für beteiligte Unternehmen dar, worunter vor allen Dingen Schulungen, Fragebögen zur Selbstauskunft oder lokale Netzwerke zu nennen sind (Drive Sustainability 2018a). 2018 wurde gemeinsam mit der Responsible Minerals Initiative die Studie „Material Change“ veröffentlicht, die die globalen Lieferketten von 37 Materialien, darunter auch Lithium, Kobalt, Kupfer, Nickel, Platin und Seltenerdmetalle, analysierte und eine Handlungsbasis bietet (Drive Sustainability 2018b).

Die 2006 in den USA gegründete Initiative IRMA (Initiative for Responsible Mining Assurance) hat sich zum Ziel gesetzt, soziales und ökologisches Verantwortungsbewusstsein im Bergbausektor voranzutreiben. Hierzu können sich Bergwerke nach einem global geltenden Standard zertifizieren lassen. Sie besteht aus Nichtregierungsorganisationen, Unternehmen, betroffenen Gemeinden, Bergbauunternehmen und Gewerkschaften (IRMA 2019).

Alle genannten Initiativen haben sich einem gemeinnützigen Zweck verschrieben und stehen Interessenvertretern aus allen Bereichen der Lieferkette offen. Die Initiativen für Stahl, Mineralien und Aluminium verzeichnen vor allem mit dem Instrument der freiwilligen Zertifizierung Erfolge. So ist die Responsible Steel Initiative im Begriff, einen ISEAL-Code²²-konformen Zertifizierungsprozess anzubieten, der Glaubwürdigkeit schafft.

Als Beispiel eines Zusammenschlusses von führenden Konzernen und Verbänden der Bergbau- und Metallindustrie ist das 2001 gegründete International Council on Mining and Metals (ICMM) zu erwähnen. Die Mitglieder haben sich dazu verpflichtet, die zehn ICMM-Prinzipien und sechs Positionspapiere in ihrer Unternehmenspolitik umzusetzen. Darin sind klare Zielvorgaben in Fragen der nachhaltigen Firmenpraxis, Menschenrechte, Sicherheits-, Gesundheits- und Umweltbelange sowie zu sonstigen Belangen der Arbeiter und lokalen Bevölkerung enthalten. Zudem verpflichten sie sich, ein transparentes und von unabhängigen Dritten geprüfetes Monitoring- und Reporting-System zu etablieren (Shaping Sustainable Markets 2018).

22 | ISEAL stellt einen Überbau dar, in dem Nachhaltigkeitsstandards organisiert sind (ISEAL 2019).

Generell wird deutlich, dass der Erfolg der Initiativen zunächst einerseits von der Dauer ihres Bestands und andererseits von der Anzahl und dem Antrieb ihrer Mitglieder abhängt. Außerdem ist es von Vorteil, die gesamte Lieferkette durch eine möglichst durchgängige Kette von Mitgliedern abzudecken und so Synergieeffekte zu nutzen und die Effektivität der Aktivitäten sicherzustellen. Da einige der Initiativen erst in der jüngeren Vergangenheit ins Leben gerufen wurden, wird sich bei ihnen erst im Verlauf der zukünftigen Entwicklung zeigen, ob sie tatsächlich Verbesserungen der ethischen Bedingungen bewirken können.

Insbesondere die Automobilindustrie zeigt auch abseits der beschriebenen Initiativen starkes positives Engagement. So verkündete beispielsweise der VW-Konzern Ende 2017, dass er als Ergebnis des Dialogs mit den in seiner Lieferkette vangeschalteten Unternehmen die Regeln seiner Rohstoffbeschaffung insbesondere für Elektrofahrzeuge verstärkt hat. Dies betreffe Standards bezüglich Transparenz, Umwelt und Sicherheit sowie soziale Standards, beispielsweise um Kinder- und Zwangsarbeit auszuschließen (Volkswagen 2017).

Die Daimler AG hat ein Human Rights Respect System eingeführt, das zunächst die sozialen Risiken der Rohstoffbeschaffung, zu denen u.a. Kinderarbeit, Arbeitsbedingungen und die Einhaltung der Menschenrechte zu zählen sind, bewertet, dann in einem zweiten Schritt entsprechende Maßnahmen ergreift, diese überwacht und schließlich ein Berichtssystem pflegt (Daimler AG 2018b).

Ende 2018 gab BMW bekannt, nach der Durchführung einer Machbarkeitsstudie ein Pilotprojekt in der DR Kongo gemeinsam mit BASF sowie Samsung SDI und Samsung Electronics unter der Koordination der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) für eine geplante Laufzeit von drei Jahren gestartet zu haben. Das Ziel dabei ist, die Arbeits- und Lebensbedingungen im nichtindustriellen Kleinstbergbau zu verbessern (BMW Group 2018b). Laut einem Medienbericht arbeiten außerdem BMW, das schwedische Batterieunternehmen Northvolt sowie der belgische Materialtechnologie- und Recyclingkonzern Umicore seit 2018 in einer Initiative zusammen, um eine nachhaltige Wertschöpfungskette sowie einen vollständigen Kreislauf für Batterien zu entwickeln (BMW Group 2018c). Anfang 2018 vereinbarte BMW mit dem chilenischen Bergbaukonzern Codelco die Gründung der Responsible Copper Initiative. Diese soll die soziale und ökologische Verantwortung beim Kupferabbau fördern und zudem die Transparenz in der Kupferlie-

ferkette erhöhen, indem einheitliche Standards geschaffen werden (BMW Group 2018a).

Nicht zuletzt stellt die Politik einen zentralen Akteur dar, der durch gezieltes Handeln zum Erfolg und zu einer langfristigen Verbesserung der mit dem Abbau verbundenen Rahmenbedingungen beitragen kann. So gibt es auf deutscher Ebene die Initiative Nationaler Aktionsplan „Wirtschaft und Menschenrechte“, die die weltweite Menschenrechtssituation in allen Industriesektoren verbessern möchte, indem die von den Vereinten Nationen 2011 verabschiedeten Leitprinzipien für Wirtschaft und Menschenrechte in die Praxis umgesetzt werden. Beteiligte Akteure entlang der Liefer- und Wertschöpfungskette sind neben dem Staat Unternehmen, die Zivilgesellschaft sowie Gewerkschaften. Von der Bundesregierung wurde das Ziel gesteckt, dass im Zeitraum zwischen 2016 und 2020 mindestens 50 % der deutschen Unternehmen mit über 500 Mitarbeitern die im Aktionsplan beschriebenen Prozesse in ihrem Unternehmen implementiert haben. Dazu gehören Arbeits-, Sozial- und Umweltstandards wie beispielsweise faire Bezahlung und Einhaltung des Mindestlohngesetzes (Auswärtiges Amt 2017).

Auch auf europäischer Ebene sind in dieser Hinsicht wichtige Entwicklungen zu nennen: Mitte 2017 hat die EU eine Verordnung auf Basis der OECD-Leitsätze zur Erfüllung der Sorgfaltspflichten in der Lieferkette der sogenannten Konfliktrohstoffe (Gold, Tantal, Wolfram, Zinn) verabschiedet, die 2021 für alle Mitgliedsstaaten verbindlich wird. Unternehmen, die eine bestimmte jährliche Einfuhrmenge überschreiten, müssen einen Herkunftsnachweis der genannten Materialien erbringen. Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) zur kontrollierenden Instanz für Deutschland erklärt. Bis 2021 finden die Abstimmungsprozesse der beiden deutschen Einrichtungen mit der EU statt, um ab 2022 in der Lage zu sein, Importkontrollen durchzuführen (BGR 2018b).

Auf internationaler Ebene kann auch das Beispiel des Dodd-Frank Act angeführt werden. Dabei handelt es sich um ein 2010 in Kraft getretenes US-amerikanisches Gesetz. Es beinhaltet neben Reformen des US-Finanzmarktrechts auch Pflichten für US-börsennotierte Unternehmen sowie deren globale Zulieferketten, so dass die Verwendung und Herkunft sogenannter Konfliktminerale aus der DR Kongo sowie aus ihren Nachbarstaaten offengelegt werden muss. Für den Fall der Herkunft aus diesen Staaten ist ein geprüfter „Conflict

Minerals Report“ zu erstellen, der genaue Beschaffungsinformationen enthält. Ein Merkblatt mehrerer deutscher Verbände zu diesem Gesetz kommt zu dem Schluss, dass es einen großen Einfluss auf die Industrie genommen hat. Die Verbände führen dies insbesondere auf die potenzielle Gefahr einer Rufschädigung zurück (BDI 2013). Anhand dieses Beispiels wird deutlich, welche Auswirkung allein ein Transparenzgebot auf die Materialbeschaffung von Unternehmen haben kann.

Als weiterer Akteur staatlicher Initiativen der deutschen technischen Zusammenarbeit ist die BGR zu nennen, die bereits zahlreiche Projekte und Untersuchungen im Bereich einer nachhaltigen und sozial verträglichen Rohstoffförderung durchgeführt hat – überwiegend zu den bereits genannten Konfliktmineralien Tantal, Zinn, Wolfram und Gold. Zu ihren Aufgabenbereichen gehört dabei die Beratung von Entwicklungsländern zum verbesserten Management im Bergbausektor, wie beispielsweise beim Implementieren eines Inspektionswesens und international gängiger Arbeits-, Sicherheits- und Umweltstandards. Auch die besonderen Herausforderungen im Kleinbergbau werden dabei explizit mit dem Ziel mit einbezogen, diesen Sektor zu formalisieren und weiterzuentwickeln und somit auch aus diesem Sektor einen verantwortungsvollen Rohstoffbezug zu ermöglichen. Zudem betreibt die BGR Unterstützungsarbeit bezüglich der Nachverfolgbarkeit entlang der Lieferketten und der Implementierung internationaler Anforderungen (BGR 2018a).

So konnten bereits im Bereich des Konfliktmineralien-Kleinbergbaus in der DR Kongo und angrenzenden Staaten einige Fortschritte erzielt werden. Dazu zählen das von BGR-Wissenschaftlern mitentwickelte Verfahren des analytischen Fingerabdrucks, mithilfe dessen die Herkunft von Konfliktmineralien festgestellt werden kann. Des Weiteren wurde ein eigenes Zertifizierungskonzept (CTC – Certified Trading Chains) entwickelt, das bereits von 2008 bis 2011 in Ruanda implementiert und ab 2011 als Pilotprojekt auf eine kontinuierlich steigende Anzahl von Konfliktmineralien-Minen in der DR Kongo angewandt wurde. Dies wird begleitet von Schulungen für Minenbehörden und mündete in ein nationales Zertifizierungssystem. Zudem werden Kleinbergwerke unterstützt, gängige Praktiken des sicheren Bergbaus anzuwenden, damit letztendlich ein legaler Status solcher Minen möglich werden kann und die Kommunikation mit lokalen Behörden, Minenkonzernen und der lokalen Bevölkerung gestärkt wird (BGR 2019a, 2019b). Diese Vorgehensweisen, die im Bereich des Abbaus von Konfliktmineralien bereits erfolgreich eingesetzt wurden, könnten teilweise ebenso der Lö-

sung von sozialen und ethischen Problemstellungen von anderen kritischen Rohstoffen dienen, beispielsweise für den Kobalt-Kleinbergbau in der DR Kongo.

9.8 Zusammenfassung

Arbeitsbedingungen

Die Arbeitsbedingungen, unter denen die im Rahmen dieser Studie näher untersuchten Materialien abgebaut werden, ergeben im Vergleich der sechs Materialien ein sehr gemischtes Bild. So erscheinen beispielsweise die Bedingungen, unter denen Lithium abgebaut wird, deutlich weniger bedenklich als jene, unter denen Kobalt überwiegend in der DR Kongo abgebaut wird. Insbesondere der Kupferabbau unter Tage stellt ein Arbeitsrisiko für die Minenarbeiter dar, was anhand der immer wieder auftretenden Grubenunfälle deutlich wird. Auch vom Nickel- und Kobaltabbau scheinen relevante gesundheitliche Risiken für die Arbeiter auszugehen. Platin, dessen Abbau hauptsächlich in Südafrika stattfindet, weist auf Basis der Recherche eher bedenkliche sowie schwer verhandelbare Arbeitsbedingungen, z. B. die Bezahlung und Sicherheitsstandards, auf. Die Recherche zu den Arbeitsbedingungen bei Abbau und Gewinnung der Seltenerdmetalle gab nur wenig Aufschluss über die tatsächlich in China herrschenden Arbeitsbedingungen.

Umweltauswirkungen

Die Umweltauswirkungen der verschiedenen Materialien zeigen ein ähnliches Profil wie das der Arbeitsbedingungen. Während mit dem Abbau von Lithium negative Umweltauswirkungen wie insbesondere die Wasserknappheit in der Atacama-Wüste einhergehen, werden weitere bedenkliche Auswirkungen in Verbindung mit der Gewinnung von Kupfer, Kobalt, Nickel, Platin und der Seltenerdmetalle berichtet. So bringt beispielsweise der Kupferabbau die Gefahr von Schwefeldioxid- und Schwermetallemissionen mit entsprechenden Kontaminationsgefahren beispielsweise für Gewässer mit sich. Der Kobaltabbau in der DR Kongo ist mit hohen Umweltauswirkungen wie z. B. Vegetationsverlusten sowie generell geringen Umweltauflagen verbunden. Ebenso wurde Nickel im Rahmen der Rechercheergebnisse mit schädlichen Umwelteinflüssen in Verbindung gebracht. Im Hinblick auf Umweltauswirkungen des in Südafrika stattfindenden Platinabbaus führte die Recherche zu Berichten von Staub- und Schwefeldioxidemissionen, die wiederum zu Verunreinigungen von Luft, Gewässern und Böden führen. Auch der Abbau von Seltenerdmetallen in China erscheint auf Basis verschiedener Quellen, auch aufgrund des im Erz eingelagerten radioaktiven

Urans und Thoriums, gravierende ökologische Missstände wie Boden- und Gewässerkontaminationen mit sich zu bringen.

Grundrechtsgefährdungen

Hinsichtlich aller Rohstoffe sind Grundrechtsgefährdungen zu erkennen, die allerdings je nach Rohstoff und relevanten Förderländern höchst unterschiedlich ausfallen können. Während in Bezug auf Lithium insbesondere die Verwendung von Wasser und der Umgang mit indigenen Bevölkerungsgruppen relevant sind, treten für die Förderung der anderen Rohstoffe Themen in Verbindung mit den Arbeitsbedingungen und den Lebensumständen sowie in diesem Zusammenhang auch Einflüsse durch Umweltauswirkungen, insbesondere in Bezug zur Trinkwasser- und Nahrungsversorgung, aber auch hinsichtlich der menschlichen Gesundheit, in den Vordergrund.

Die Arbeitsbedingungen beim Kobaltabbau in der DR Kongo stechen vor dem Hintergrund der politischen Umstände im Land und insbesondere aufgrund der Meldungen zu Kinderarbeit in negativer Weise hervor. In diesem Zusammenhang sind auch die zur Entwicklung des Landes notwendigen Aktivitäten im Bereich der Bildung zu sehen.

Politische Rahmenbedingungen

Die Analyse der politischen Rahmenbedingungen auf Basis der von der Weltbank veröffentlichten World-Governance-Indikatoren erlaubt zwar eine konsistente Vergleichbarkeit, die Beurteilung ist jedoch nur von sehr allgemeiner Art und nicht direkt auf die Rohstoffaktivitäten bezogen. Sie kann allerdings dazu genutzt werden, sich einen Überblick über möglicherweise wichtige Themen in den politischen Rahmenbedingungen der Länder zu verschaffen, in denen die Rohstoffaktivitäten eingebettet sind.

So schneiden die wichtigsten Lithiumförderländer, Australien und Chile, anhand der betrachteten Weltbank-Indikatoren in der oberen Hälfte des Rankings ab, wohingegen insbesondere die DR Kongo sich als wichtigstes Förderland von Kobalt bezüglich aller von der Weltbank untersuchten Indikatoren im untersten Viertel findet. Auch die beiden wichtigsten Förderländer von Nickel, die Philippinen und Russland, werden anhand einiger Indikatoren in der unteren Hälfte der Bewertungsliste angesiedelt. Südafrika, als das mit Abstand wichtigste Land für die Platinförderung, schneidet hingegen bis auf die Betrachtung des Indikators „Politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt oder Terrorismus“ in allen weiteren Indikatoren in der oberen Hälfte ab. Für China, das wichtigste Förderland von Seltenerdmetallen, wird der Indika-

tor „Mitspracherecht und Verantwortlichkeit“ im Länderranking der Weltbank im untersten Viertel angesetzt, wobei vier weitere Indikatoren in der unteren Hälfte liegen. Für Kupfer zeigen sich aufgrund der breiten Verteilung der Förderländer auch entsprechend unterschiedliche Bewertungen in den Weltbank-Indikatoren.

Gesellschaftliche Beiträge

Auf Basis der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Recherche ergeben sich sehr diverse Formen gesellschaftlicher Beiträge. Die Recherche zum Seltenerdabbau in China ergab keine Anhaltspunkte zu gesellschaftlichen Beiträgen. In Südafrika, dem weltweit größten Platinförderland, konnten einzelne Beiträge wie z.B. der Aufbau lokaler Infrastrukturen sowie die Ankündigung des Häuserbaus seitens Bergbauunternehmen gefunden werden.

Die Recherchen zum Abbau von Lithium, Nickel und Kupfer ergaben mehrere Hinweise darauf, dass im Zusammenhang mit dem Rohstoffabbau aktiv Beiträge zur Entwicklung der Gesellschaft geleistet werden, die ganz unterschiedliche Formen wie z.B. Bildung, Infrastruktur, Integration und Ausbildung indigener Bevölkerungsgruppen sowie Ausgleichszahlungen annehmen.

Abschließend kann zum hauptsächlich in der DR Kongo stattfindenden Kobaltabbau angeführt werden, dass zwar die gesellschaftliche ebenso wie die politische Lage eher besorgniserregend sind. Bei den dort tätigen Minenkonzernen konnten aber gewisse gesellschaftliche Beiträge im Rahmen ihrer großen Minenprojekte festgestellt werden. Dem Abbau im Kleinbergbausektor, an dem die Bergbaukonzerne nicht beteiligt sind, kommen solche Maßnahmen jedoch nicht zugute. Bezüglich des Engagements von Unternehmensseite können allerdings die 2016 gegründete Responsible Cobalt Initiative sowie weiteres Engagement unterschiedlicher Akteure angeführt werden (Abschnitt 9.7). Diese Initiativen weisen auf ein erhöhtes Bewusstsein der verschiedenen Interessenvertreter als ersten Schritt hin. Daraus kann durch gezielte Maßnahmen und Prozesse in einem zweiten Schritt eine Verbesserung der mit dem Abbau verbundenen ethischen Dimensionen erreicht werden. Ob und wie sich diese tatsächlich umsetzen lassen und für die ethischen Aspekte in Bezug auf die für Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge als kritisch identifizierten Rohstoffen auswirken, wird sich allerdings erst in Zukunft zeigen können.

9.9 Fazit

In diesem Kapitel wurden verschiedene ethische Aspekte beleuchtet, die unmittelbar im Zusammenhang mit der Bereitstellung der als kritisch identifizierten Rohstoffe stehen. Es ist als wichtiges Rechercheergebnis festzuhalten, dass keiner der Rohstoffe gänzlich unproblematisch ist. Da die Anzahl der auffindbaren Quellen je nach Land, Rohstoff und Transparenz der Firmen sehr stark variiert, wird dadurch auch die Anzahl der verfügbaren Quellen für die entsprechenden Rohstoffe beeinflusst.

Verbesserungen der ethischen Aspekte können grundsätzlich von allen beteiligten Akteuren entlang der Lieferkette ausgehen, d.h. von den Bergbauunternehmen über die weiterverarbeitenden Unternehmen und die Politik bis hin zu zivilgesellschaftlichen Institutionen, wie z.B. Nichtregierungsorganisationen. Zudem sind die politischen Rahmenbedingungen in den Ländern, über die sich die Lieferkette erstreckt, nicht außer Acht zu lassen.

Der Multi-Stakeholder-Ansatz entlang der Lieferkette wird von vielen Rohstoffinitiativen genutzt und erscheint als ein zielführender Ansatz, um zunächst die notwendige Transparenz herzustellen und ethische Herausforderungen identifizieren zu können. Darauf aufbauend können die an der Wertschöpfung beteiligten Akteure zusammenwirken, indem Standards geschaffen und zertifizierte Herkunftsnachweise eingeführt und gefordert werden. So kann die ökologische, soziale und ökonomische Nachhaltigkeit des Abbaus, des Handels und der Verwendung der verschiedenen Materialien dauerhaft verbessert werden.



10

Betrachtungen auf
Fahrzeugebene

10

Betrachtungen auf Fahrzeugebene

Während die bisherigen Betrachtungen sich allesamt auf die Bereitstellung der einzelnen Materialien bezogen, wird in diesem Kapitel der Fokus auf die beiden Technologien, also Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge, gelegt. Hierfür werden zuerst die in den Komponenten bzw. in den Fahrzeugen erforderlichen Rohstoffmengen festgelegt (Abschnitt 10.1) und anschließend die sich für die als kritisch identifizierten Rohstoffe ergebenden Kosten bzw. der Primärenergiebedarf und die THG-Emissionen dargestellt (Abschnitt 10.2).

Des Weiteren findet eine Betrachtung der durch die Rohstoffverwendung herbeigeführten Verknappungseffekte statt. Hierzu werden die Rohstoffmengen berechnet, die theoretisch notwendig sind, um 25 % der heutigen jährlichen Fahrzeugproduktion als Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge umzusetzen. Gleichermaßen wird die Rohstoffmenge berechnet, die benötigt wird, um 25 % der heute weltweit existierenden PKW-Flotte als BEV bzw. FCEV darzustellen. Die ermittelten Mengen werden anschließend den heutigen Abbaumengen der Rohstoffe bzw. den heutigen Reserven der Rohstoffe gegenübergestellt und die Effekte werden für die verschiedenen Rohstoffe miteinander verglichen.

10.1 Materialbedarf pro Fahrzeug

Die Abschätzung der unterschiedlichen Materialbedarfe ist nicht ganz trivial, da die notwendige Menge von zahlreichen Parametern abhängt. Zu diesen gehören fahrzeugspezifische Eigenschaften, wie Leistung und Reichweite (und somit die notwendige Kapazität des Energiespeichers), aber auch technologiebezogene Größen. So hängt beispielsweise die Menge der verschiedenen Kathodenmaterialien von der gewählten Zellchemie und der damit zusammenhängenden Priorisierung der Batterieeigenschaften, wie Energiedichte, Leistungsfähigkeit, Kosten, Alterungsverhalten und Sicherheit, ab. Aufgrund der Vielzahl von Auslegungskriterien und möglichen Technologieoptionen kann sich eine große Bandbreite des Materialbedarfs pro Fahrzeug ergeben. Daher wur-

de im Rahmen dieser Studie eine Recherche durchgeführt und eine Datensammlung angelegt, auf deren Basis die im folgenden verwendeten Werte abgeleitet wurden (Tabelle 10-1). Hierfür wurden eine Batterie mit einer Kapazität von 80 kWh und ein Motor sowie eine Brennstoffzelle mit einer Nominalleistung von 100 kW (136 PS) zugrunde gelegt.

Für die Batterie wurden die Materialbedarfe für eine Lithium-Ionen-Batterie mit Nickel-Mangan-Kobalt-Kathode im Mischverhältnis (6:2:2) angesetzt. Da die Platinbeladung in der Brennstoffzelle einen Parameter von hoher Bedeutung darstellt, zu dem aufgrund der Geheimhaltung auch nur wenige Werte aus der Praxis veröffentlicht werden, werden für diesen zwei separate Szenarien dargestellt. Während angesichts des heutigen Technologiestands eine Platinbeladung von 0,35g/kW einen hohen und damit recht konservativen Wert darstellt, ist eine Verwendung von nur 0,15g/kW ein niedriger und damit recht innovativer, zukunftsgerichteter Wert. Die Ergebnisse für die beiden genannten Grenzwerte werden im folgenden Abschnitt mit FCEV (hoch) bzw. (niedrig) dargestellt.

Außerdem sei an dieser Stelle auch auf die Differenz im Kupferbedarf der beiden Fahrzeugtypen hingewiesen. Aufgrund des hohen Kupfereinsatzes in der Batterie ergibt sich für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge ein deutlich geringerer Kupferbedarf. Abbildung 10-1 zeigt die Aufteilung einer typischen Batterie anhand der Komponenten und der darin enthaltenen Materialien. Daraus geht hervor, dass das Batteriepackgehäuse bedeutenden Anteil am Gesamtgewicht der Batterie hat, er kann durchaus größer sein als beispielsweise das Aktivmaterial der Kathode. Zwar nehmen die Anteile von Gehäuse oder auch BMS tendenziell für Batteriepacks mit größeren Kapazitäten ab, allerdings reduziert sich die notwendige Menge des Aktivmaterials auch durch die steigende Energiedichte im Rahmen der technischen Entwicklungen, was diesen Effekt wiederum ausgleicht.

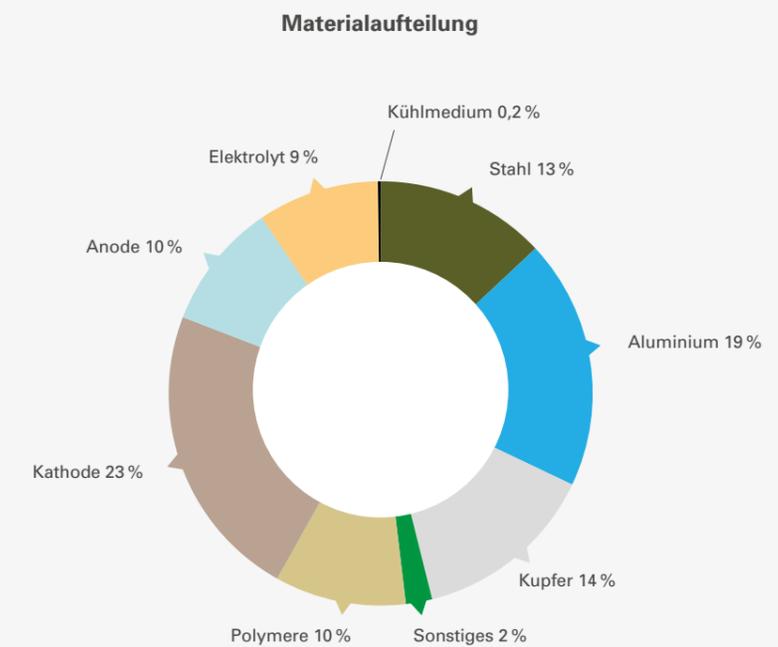
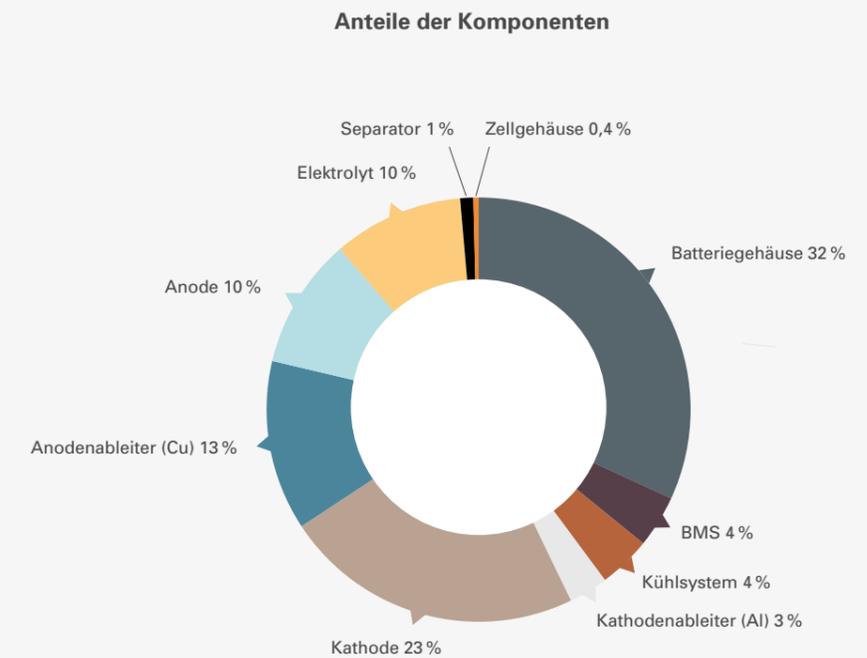


Abbildung 10-1: Typische Anteile von Komponenten (oben) und Materialien (unten) in der Batterie eines BEV

© nach Ellingsen et al. 2014

	Spezifischer Bedarf	Materialbedarf pro PKW	Quellen
Lithium	120g/kWh	9,6 kg	(Buchert et al. 2011a; Argonne National Laboratory 2018; Öko-Institut 2016)
Kobalt	180g/kWh	14,4 kg	(Buchert et al. 2011a; Argonne National Laboratory 2018; Ellingsen et al. 2014; Öko-Institut 2016)
Nickel	530g/kWh	42,4 kg	(Buchert et al. 2011a; Argonne National Laboratory 2018; Ellingsen et al. 2014; Öko-Institut 2016)
Platin	0,15–0,35g/kW (niedrig–hoch)	15–35 g (niedrig–hoch)	(Öko-Institut 2016; Wittstock et al. 2016; Öko-Institut 2017; Department of Energy 2017; McKinsey 2010; thinkstep AG 2018b)
Seltenerdelemente	5 g Nd/kW 1 g Dy/kW (25 % bzw. 5 % der Magnetmasse)	0,5 kg Nd 0,1 kg Dy	(Buchert et al. 2014; Öko-Institut 2017; Berkel 2013; Widmer et al. 2015; Burres 2016; Adler 2017; Schüler et al. 2011; Reuter 2016; Glöser-Chahoud et al. 2016)
Kupfer in Batteriezellen	650g/kWh	52 kg	(Buchert et al. 2011a; Argonne National Laboratory 2018; Öko-Institut 2016)
Kupfer im Batteriepack (ohne Zellen)	150g/kWh	12 kg	(Buchert et al. 2011a)
Kupfer in den Nebenaggregaten der Brennstoffzelle	100g/kW	10 kg	(Öko-Institut 2016)
Kupfer im Motor	100g/kW	10 kg	(UBS Limited 2017; Reuter 2016)
Kupfer im BEV (mit 80-kWh-Batterie)	---	95 kg	Berechnet auf Basis von (Brandenburg und Torsten 2018), (Lepan 2018)
Kupfer im FCEV (mit 100-kW-BZ)	---	41 kg	Berechnung mittels der hier dargestellten Angaben

Tabelle 10-1: Abschätzung des Materialbedarfs für BEV und FCEV

10.2 Betrachtung von Kosten und ökologischen Aspekten

Auf Basis der ermittelten Materialmengen pro Fahrzeug (BEV und FCEV) werden in diesem Abschnitt die entsprechenden Beiträge zu den Kosten und den ökologischen Auswirkungen auf Basis eines Fahrzeugs ermittelt. Wie zuvor (Abschnitt 10.1) dargestellt, wird für ein Fahrzeug eine (nominelle) Antriebsleistung von 100 kW und für das BEV eine Batteriespeicherkapazität von 80 kWh angenommen. Mit den in Tabelle 10-2 dargestellten Materialpreisen, die aus den Darstellungen in Kapitel 6 abgeleitet wurden, und den im vorigen Abschnitt ermittelten Materialbedarfen ergeben sich die in Abbildung 10-2 dargestellten Kostenbeiträge durch die als kritisch identifizierten Rohstoffe.

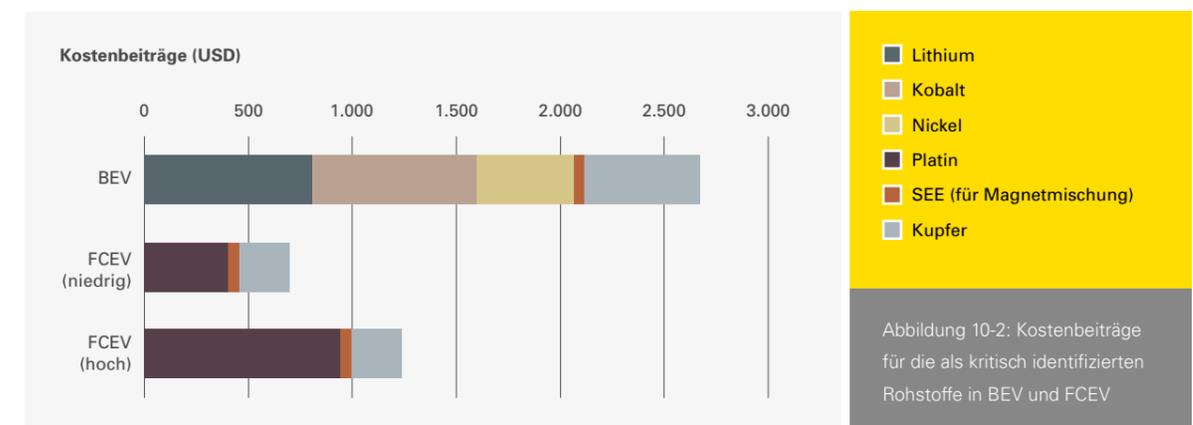
	Li	Co	Ni	Pt	Nd	Dy	Cu
Preis	75 ²³ \$/kg	54 \$/kg	11 \$/kg	25.720 \$/kg	58 \$/kg	244 \$/kg	5,9 \$/kg

Tabelle 10-2: Preise für die als kritisch identifizierten Rohstoffe zum Jahresende 2018

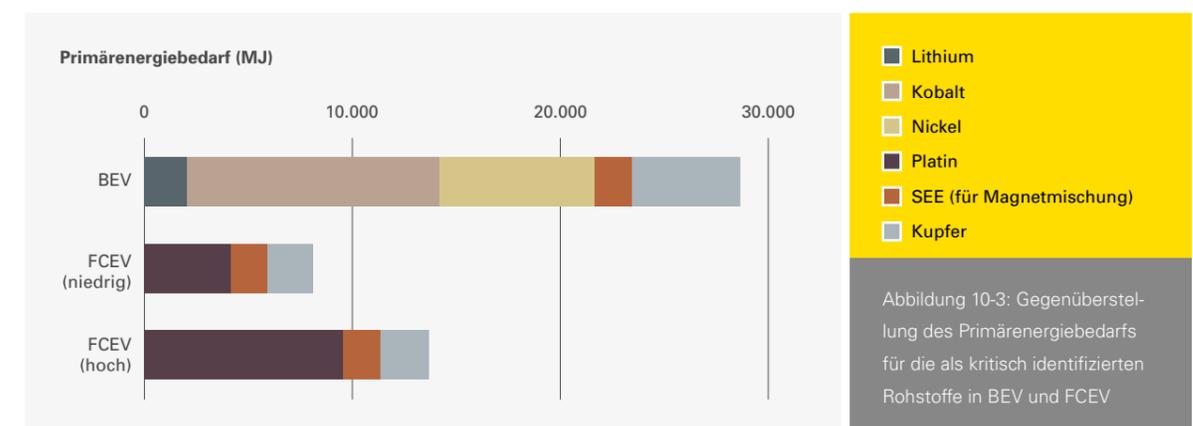
23 | Der Lithiumpreis berechnet sich durch den stöchiometrischen Anteil von Lithium aus dem Preis für das gehandelte Lithiumcarbonat (Abschnitt 6.1).

Die höchsten Kostenbeiträge ergeben sich für das BEV durch Lithium und Kobalt. Auch von der Verwendung von Kupfer und Nickel geht ein beträchtlicher Kostenbeitrag aus, wohingegen interessanterweise die Kosten für die beiden Seltenerdmetalle einen zu vernachlässigenden Kostenbeitrag verursachen. Wird für Kobalt anstatt des Preises zum Jahresende 2018 der Preis zu Mitte Februar 2019 von rund 30.000 \$/t angesetzt, so verringert sich dessen Kostenbeitrag entsprechend und liegt dann unter dem Kostenanteil von Nickel.

Auch die Kosten, die aus der Verwendung von Platin resultieren, sind insbesondere für eine hohe Platinbeladung deutlich zu sehen. Im Szenario mit geringerer Platinbeladung sind diese jedoch nur knapp halb so hoch. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass hier nur die im Rahmen von Kapitel 3 als kritisch identifizierten Rohstoffe betrachtet werden und weitere Materialien und Komponenten berücksichtigt werden müssten (z. B. die für die H₂-Speichertanks), um einen umfassenden und belastbaren Vergleich zwischen den beiden Fahrzeugtechnologien vornehmen zu können.



Zur Bewertung der ökologischen Auswirkungen wird in Abbildung 10-3 der Primärenergiebedarf der drei Fahrzeugkonfigurationen dargestellt. Für das BEV liegt der Primärenergiebedarf für Kupfer in der gleichen Größenordnung wie der von Nickel. Kobalt hat den größten Beitrag zum Primärenergiebedarf des BEV, wohingegen Lithium ebenso wie die Seltenerdmetalle einen geringeren Beitrag zum Primärenergiebedarf ausmachen. Der Beitrag von Platin ist je nach betrachteter Platinbeladung in der Brennstoffzelle deutlich bis stark. Allerdings ist der gesamte Primärenergiebedarf aller als kritisch identifizierten Rohstoffe selbst im ungünstigen Szenario für das FCEV deutlich geringer als für das BEV.



Für die THG-Emissionen (Abbildung 10-4, oben) ergibt sich ein anderes Bild. Je nach Szenario ergeben sich für das FCEV niedrigere bzw. leicht höhere THG-Emissionen aus der Bereitstellung der als kritisch identifizierten Rohstoffe als für das BEV. Für das FCEV stammt der Großteil der THG-Emissionen aus der Platinbereitstellung, wohingegen die Bereitstellung der Seltenerdmetalle und des Kupfers einen geringeren Beitrag erfordert. Unter den als kritisch identifizierten Rohstoffen für das BEV sind Nickel, Kobalt und Kupfer die wichtigsten Verursacher von Treibhausgasemissionen.

Werden die THG-Emissionen aus der Bereitstellung der als kritisch identifizierten Materialien unter der Annahme betrachtet, dass der verwendete Strom aus erneuerbaren Energien stammt (Abbildung 10-4, unten), zeigen sich für das FCEV deutlich geringere THG-Emissionen, unabhängig von der angesetzten Platinbeladung der Brennstoffzelle. Die Emissionen aufgrund von Kobalt und Nickel bleiben auch bei Bezug von Strom aus erneuerbaren Energien deutliche THG-Verursacher, wenn auch auf insgesamt niedrigerem Niveau.

10.3 Rohstoffnachfrage durch BEV und FCEV

In diesem Abschnitt soll der Bedarf an den für BEV und FCEV als kritisch identifizierten Rohstoffen auf makroskopischem Maßstab einander gegenübergestellt werden. Da von beiden Fahrzeugtechnologien erhebliche Veränderungen in der globalen Angebots- und Nachfragestruktur zu erwarten sind, soll an dieser Stelle die notwendige Ausweitung des Fördervolumens bzw. der Abgleich mit den heute wirtschaftlichen Reserven der Rohstoffe erfolgen. Hierbei steht das Ziel im Vordergrund, die Rohstoffe für die zu untersuchenden Technologien anhand der genannten Effekte einander gegenüberzustellen. Entsprechend sollen keine Effekte aus anderen Anwendungsbereichen in die Betrachtung einfließen. Ebenso wenig soll an dieser Stelle eine Prognose vorgenommen werden, wie sich der Verkehrssektor in Zukunft entwickeln wird, da dadurch Annahmen mit entsprechenden Unsicherheiten in die Betrachtung und die damit generierten Ergebnisse eingehen. Stattdessen bleibt der Fokus auf die beiden Fahrzeugkonzepte und deren Rohstoffbedarf und die Frage gerichtet,

wie deren zukünftige Verbreitung angesichts der heutigen Volumina von Rohstoffbereitstellung und verfügbarer Menge der Reserven zu bewerten ist.

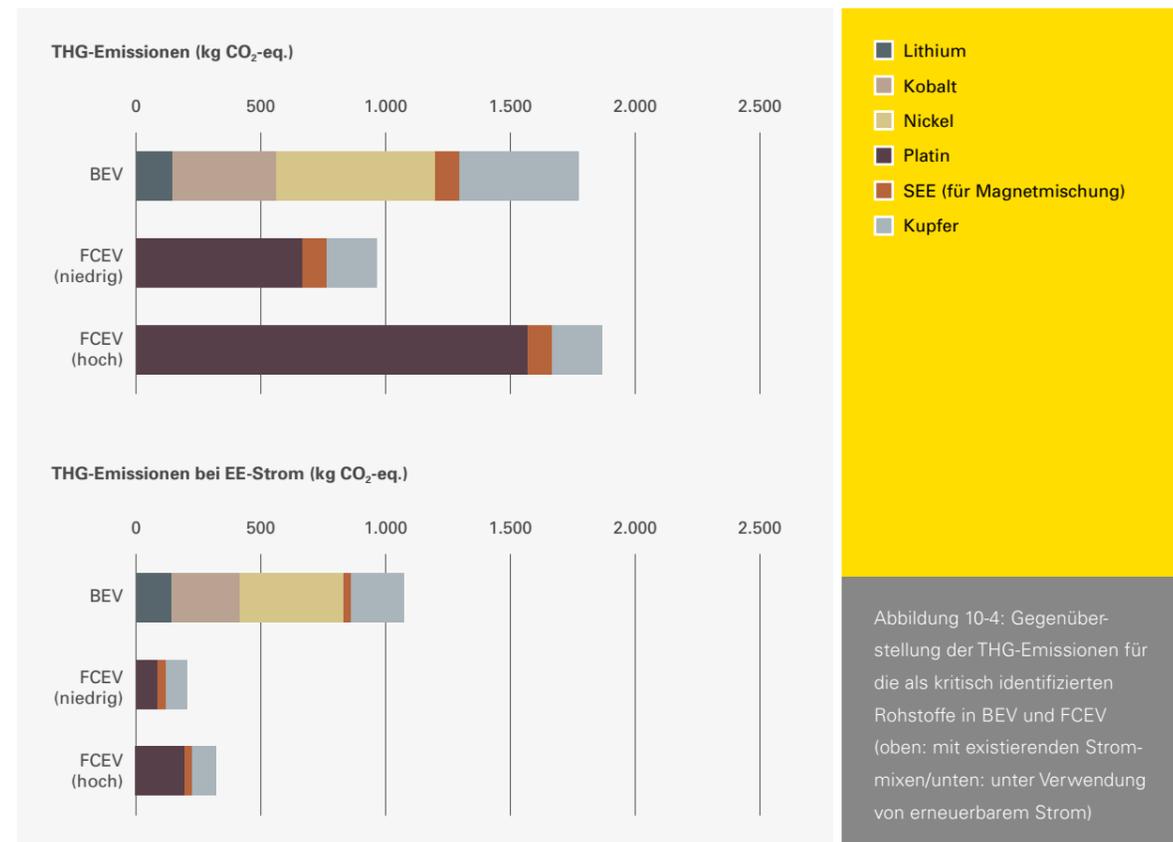
Laut OICA sind im Jahr 2017 rund 73 Mio. PKW produziert worden (OICA 2017) und 2015 waren knapp 950 Mio. PKW in Benutzung (OICA 2015). Zwar nimmt die Anzahl an jährlich produzierten Fahrzeugen ebenso wie die Anzahl der aktuell genutzten Fahrzeuge stetig zu, doch soll, wie bereits erwähnt, nicht durch entsprechende Prognosen Unsicherheit in die Betrachtung eingebracht werden. Hierfür wird angenommen, dass 25 % der heutigen Fahrzeugproduktion Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge mit dem zuvor ermittelten Materialbedarf darstellen.

Wie Tabelle 10-3 zeigt, ist für manche Rohstoffe eine erhebliche Ausweitung der heutigen Fördermengen notwendig, um die Nachfrage zu decken, die sich aus der theoretischen Umstellung von 25 % der Fahrzeugproduktion auf die entsprechende Technologie ergäbe. So wäre beispielsweise die Lithiumproduktion auf mehr als das Fünffache der aktuellen Förderung zu erhöhen und auch die Kobaltproduktion müsste erheblich gesteigert werden, um den Bedarf an Batterien in PKW mit knapp dem Doppelten des heutigen Volumens der Kobaltförderung zu decken. Für die Produktion der Brennstoffzellen wäre je nach Szenario bei geringerer Platinbeladung ungefähr das Eineinhalbfache und bei höherem Platinbedarf das Dreieinhalbfache der heutigen Primärförderung

notwendig, um die Produktion von Brennstoffzellen für PKW zu ermöglichen. Dabei ist zu beachten, dass die Primärförderung nicht gesamtheitlich den Verwendungsszenarien zugeführt werden kann, da Platin auch in anderen Anwendungen benötigt wird (siehe Kapitel 4). Zur Herstellung von Permanentmagneten wäre knapp die Hälfte der heutigen Neodymförderung bzw. etwas mehr als die heute bestehende Fördermenge an Dysprosium erforderlich, um die erforderliche Magnetproduktion für Elektromotoren zu bedienen. Knapp die Hälfte der heutigen Nickelförderung wäre ebenso wie 10 % bzw. 5 % der heutigen Kupferförderung notwendig.

Wie zuvor bereits angesprochen stellt diese Betrachtung keine Prognose der zukünftigen Materialbedarfe dar, sondern dient der Gegenüberstellung der Effekte auf die Bereitstellung der für die beiden Technologien als kritisch identifizierten Rohstoffe. Zu diesem Zweck reicht eine Gegenüberstellung auf Basis der PKW-Herstellung aus, da der zusätzliche Materialbedarf durch Nutzfahrzeuge zwar beträchtlich ist, der Bedarf für den PKW-Sektor aber dennoch dominiert (siehe auch (Öko-Institut 2017)).

Neben der Frage, inwieweit der Bedarf von Batterie- und Brennstoffzellen-PKW zu einer notwendigen Ausweitung der heutigen Rohstoffförderung führen muss, stehen natürlich auch Fragen nach der verfügbaren Gesamtmenge der Materialien und ggfs. nach eintretenden Verknappungseffekten im Fokus des allgemeinen Interesses.



	Li	Co	Ni	Pt (niedrig)	Pt (hoch)	Nd	Dy	Cu
Jährlicher Bedarf für 25 % BEV-Produktion	175 kt	263 kt	774 kt	—	—	9,1 kt	1,8 kt	1,7 Mt
Jährlicher Bedarf für 25 % FCEV-Produktion	—	—	—	275 t	640 t	9,1 kt	1,8 kt	750 kt
Primärförderung 2015²⁴ (t/a)	32,1 kt	144 kt	2,1 Mt	188 t	188 t	20,6 kt ²⁵	1,5 kt ²⁵	18,2 Mt
Verhältnis bei 25 % BEV	545 %	185 %	37,5 %	—	—	45 %	120 %	10 %
Verhältnis bei 25 % FCEV	—	—	—	145 %	340 %	45 %	120 %	5 %

Tabelle 10-3: Theoretischer jährlicher Bedarf (absolut) der als kritisch identifizierten Rohstoffe und das Verhältnis dieses Bedarfs zur aktuellen Fördermenge für 25 % Anteil an der jährlichen Fahrzeugproduktion

24 | Die Daten für Platin basieren auf (Schmidt 2015), Basisjahr 2013.

25 | Die Datenbasis bzgl. Produktions- und Reservenangaben zu den einzelnen Seltenerdmetallen ist äußerst dünn und häufig sind entsprechende Informationen nicht aktuell. Dennoch wurde auf Basis einer Recherche ((Kingsnorth 2018) in Abgleich mit (Voncken 2016; Schüler et al. 2011; USGS 2018b)) eine Abschätzung vorgenommen und der Nd-Anteil an der SEE-Förderung und Reserven zu 19,1 % bzw. der Dy-Anteil zu 1,4 % festgelegt.

	Li	Co	Ni	Pt (niedrig)	Pt (hoch)	Nd	Dy	Cu
Gesamtbedarf für 25 % BEV	2,3 Mt	3,4 Mt	10,1 Mt	—	—	119 kt	24 kt	23 Mt
Gesamtbedarf für 25 % FCEV	—	—	—	3,6 kt	8,3 kt	119 kt	24 kt	10 Mt
Wirtschaftlich abbaubare Reserven	14,4 Mt	7,2 Mt	79,2 Mt	37,5 kt ²⁶	37,5 kt ²⁶	20,7 Mt ²⁵	1,5 Mt ²⁵	720 Mt
Verhältnis bei 25 % BEV	16 %	48 %	13 %	—	—	0,5 %	1,5 %	3 %
Verhältnis bei 25 % FCEV	—	—	—	9,5 %	22 %	0,5 %	1,5 %	1,5 %

Tabelle 10-4: Theoretischer Gesamtbedarf (absolut) der als kritisch identifizierten Rohstoffe und das Verhältnis dieses Bedarfs zu den heutigen wirtschaftlich abbaubaren Reserven für eine Umstellung von 25 % der globalen PKW-Flotte

In Tabelle 10-4 werden die Rohstoffmengen dargestellt, die notwendig wären, um 25 % der globalen PKW-Flotte des Jahres 2017 als BEV bzw. FCEV darzustellen. Interessanterweise zeigt sich, dass die heutigen Reserven aller Rohstoffe ausreichen würden, um den Materialbedarf für die betrachtete Fahrzeugmenge zu erfüllen. Allerdings wäre hierfür knapp die Hälfte der aktuellen Kobaltreserven und knapp ein Viertel der geschätzten Platinreserven – im Szenario der hohen Platinbeladung – notwendig, um den sich ergebenden Bedarf zu decken. Für das Szenario mit geringerer Platinbeladung berechnet sich der Bedarf jedoch nur auf knapp 10 % der heutigen Reserven.

Da die von der USGS ausgewiesenen landgebundenen Kobaltressourcen 25 Mio. t und die Schätzung der PGM-Reserven mehr als 100.000 t betragen, liegt darüber hinaus die Vermutung nahe, dass sich die heutigen Reserven beider Rohstoffe in Zukunft durch die bereits beschriebenen Mechanismen stark ausweiten könnten (Kapitel 5). Des Weiteren nimmt Recycling bereits heute für die Deckung des Platinbedarfs einen hohen Stellenwert ein, was in Zukunft auch für Kobalt erwartet wird (Abschnitt 8). Bei Platin ist insbesondere noch anzuführen, dass der Bedarf für Katalysatoren in Zukunft stagnieren oder sogar sinken könnte, was im folgenden Abschnitt kurz thematisiert wird.

Entwicklungen des Platinbedarfs für FCEV und Verbrennerfahrzeuge

Zur Beurteilung von Platin für zukünftige Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge ist zu beachten, dass auch in Katalysatoren von herkömmlichen Dieselfahrzeugen Platin enthalten ist. Für eine Abschätzung der Steigerung des Platingesamtbedarfs im Zuge der Elektromobilität muss also auch der Rückgang der Nachfrage für Dieselfahrzeuge beachtet werden, wenn diese durch Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge ersetzt werden.

Der Platinbedarf für Dieselmotoren wird in verschiedenen Medienberichten mit 3 bis 8 g pro Fahrzeug angegeben (websiteswithname.com 2019; Lenson 2018), also durchaus geringer als in den gegebenen Werten für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (Abschnitt 10.1). In einem PGM-Marktbericht von Johnson Matthey wird zum einen der geringere Platinbedarf für Katalysatoren angeführt, der auf Steigerungen der Materialeffizienz sowie die gebremste Nachfrage nach Dieselfahrzeugen zurückzuführen ist. Des Weiteren wird von geringeren Platinwerten in zukünftigen Dieselmotoren ausgegangen (Johnson Matthey 2018), da aufgrund der höheren Grenzwerte der Trend zur erweiterten Nutzung der SCR-Technologie (Selektive Katalytische Reduktion) gehe und somit weniger Platin für die Abgasnachbehandlung benötigt werde.

10.4 Fazit

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die als kritisch identifizierten Rohstoffe einzeln gegenübergestellt wurden, erfolgte an dieser Stelle eine Einordnung auf Fahrzeugebene. Dazu wurden zuerst die pro Fahrzeug notwendigen Mengen der Rohstoffe ermittelt und die entsprechenden Rohstoffkosten sowie die ökologischen Kenngrößen pro Fahrzeug betrachtet. Hierbei zeigt sich, dass die Kostenbeiträge von Lithium, Kobalt und Kupfer im BEV relativ hoch sind, während die Kosten der Seltenerdmetalle sehr gering ausfallen. Die Kosten für Nickel liegen zwischen diesen beiden Extremen. Für FCEV ergibt sich je nach Szenario zur Platinbeladung ein mittlerer bis hoher Kostenbeitrag, wobei Kupfer hier geringere Kosten verursacht. Hinsichtlich der ökologischen Betrachtung von Primärenergiebedarf und THG-Emissionen entfällt die größte Bedeutung auf die Metalle Kobalt, Nickel, Platin und Kupfer.

Anhand des Vergleichs der notwendigen Rohstoffmengen, um einen Anteil von 25 % der jährlichen Fahrzeugproduktion bzw. eine Durchdringung von BEV und FCEV in der globalen Flotte mit den heutigen Fördermengen bzw. den Reserven zu realisieren, zeigt sich, dass eine physische Verknappung der verfügbaren Mengen deutlich weniger wahrscheinlich ist als temporäre Lieferengpässe. Um einen signifikanten Anteil an BEV oder FCEV zu fertigen, muss insbesondere die heutige Bereitstellung von Lithium, Kobalt, Platin und Dysprosium deutlich ausgeweitet werden. Zwar sind solche Kapazitätswachse im Bergbau nicht unüblich, dennoch besteht hier das Risiko zeitweiser Verknappungen, wenn das Angebot die Nachfrage nicht decken kann. Zwar wurden weitere Bedarfe, wie der Bedarf für Nutzfahrzeuge, in der Abschätzung nicht berücksichtigt, aber es wurde dennoch kein grundsätzliches Hindernis identifiziert, das den zukünftigen Einsatz der beiden Technologien längerfristig verhindern könnte. Dies deckt sich mit Einschätzungen in anderen Quellen (Öko-Institut 2017; Pehlken et al. 2017).



²⁶ | Es finden sich kaum belastbare Quellen zu den Reserven der einzelnen Platingruppenmetalle. Daher wird an dieser Stelle eine Schätzung vorgenommen, indem die von der USGS angegebenen Reserven USGS 2018a mit den in Schmidt 2015 angegebenen Platininhalt in den verschiedenen Ländern verrechnet wurde, woraus ein durchschnittlicher Platingehalt von rund 57 % resultiert.



11

Handlungsempfehlungen und Fazit

11

Handlungsempfehlungen und Fazit

Rohstoffe sind eine erfolgsentscheidende Voraussetzung für innovative Fahrzeugtechnologien sowie andere Zukunftsanwendungen. Die vielfältigen Aspekte und Fragestellungen, die sich aus dem Rohstoffbedarf der Technologien ergeben – wie konzentrierte geologische Vorkommen, politische Abhängigkeiten, physische Verknappungen oder zeitweilige Versorgungsengpässe, Kostenrisiken, ökologische Auswirkungen und, nicht weniger wichtig, die ethisch-sozialen Bedingungen entlang der Rohstofflieferkette, sind allesamt von ungemeiner Wichtigkeit. Die Antworten auf die Frage, wie die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen gemeistert werden können, stellen daher eine Voraussetzung für den Erfolg der entsprechenden Technologien dar. Somit ist es unerlässlich, sich frühzeitig und intensiv mit den genannten Herausforderungen auseinanderzusetzen und eine entsprechende Strategie zu entwickeln. Dies gilt für die Politik und für die verarbeitende Industrie ebenso wie für die Rohstoffanbieter und Recyclingunternehmen sowie weitere relevante Akteure. Die vorliegende Studie soll hierfür eine Basis darstellen und die aus den Ergebnissen abgeleiteten und im Folgenden dargestellten Handlungsempfehlungen sollen Schritte in die richtige Richtung weisen.

1. Reduktion von Rohstoffabhängigkeiten

Viele der genannten Herausforderungen lassen sich auf Seiten der Automobilhersteller durch eine Reduktion des Bedarfs an kritischen Rohstoffen oder durch eine Steigerung der Flexibilität hinsichtlich der einsetzbaren Technologien minimieren. Ersteres stellt ein permanentes Bestreben der Industrie, insbesondere der Automobilhersteller, dar. Entsprechend wird sich der aktuelle Trend fortsetzen, die Verwendung von Platinbeladung in Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen weiter zu reduzieren. Deutlich größere Anstrengungen sind jedoch zur Steigerung der Technologieflexibilität in einem Fahrzeug notwendig, um

Komponenten mit weniger kritischen Rohstoffen zu verwenden und Rohstoffabhängigkeiten dadurch zu reduzieren. Sind verschiedene Batteriezellen oder Elektromotoren in einem Fahrzeug einsetzbar, ergibt sich hieraus eine völlig neue Dimension der Flexibilität. So kann ein Automobilhersteller beispielsweise auf ungünstige Preisentwicklungen in der Zukunft reagieren und für das Batteriepack auf Lithium-Eisenphosphat-Zellen zurückgreifen, die weder Nickel noch Kobalt enthalten.

Natürlich bringt dieser Ansatz erheblichen zusätzlichen Entwicklungsbedarf mit sich. Allerdings kann sich die dadurch geschaffene Flexibilität bei Lieferengpässen und Preisspitzen auszahlen. Des Weiteren werden die Anpassungsmöglichkeiten des Fahrzeugangebots an verschiedene Märkte und die dort gegebenen Kundenanforderungen bzw. deren Zahlungsbereitschaft deutlich ausgeweitet. Die Flexibilität kann sogar als Konfigurationsmöglichkeit an die Kunden weitergegeben werden, die dann selbst zwischen Leistungsfähigkeit und Kosten entsprechend ihren individuellen Bedürfnissen abwägen können.

Aufgrund der dargestellten Vorteile erscheint es für die Automobilindustrie höchst zielführend, nicht nur den Bedarf an kritischen Rohstoffen in den Komponenten zu reduzieren, sondern darüber hinaus mehr Flexibilität hinsichtlich der einsetzbaren Technologien zu schaffen.

2. Kooperation zwischen verarbeitender Industrie und Rohstoffanbietern

Um die Versorgung mit kritischen Rohstoffen sicherzustellen, ist eine vertiefte und längerfristige Kooperation zwischen Rohstoffanbietern und der Automobilindustrie essenziell. Da das Erschließen von Rohstoffförderung und der Aufbau von entsprechenden Kapazitäten sehr kapitalintensiv sind und Planungshorizonte von mehreren Jahren erfordern, werden

derartige Investments nur bei hohen Marktpreisen und entsprechender Erlöserwartung sowie Planungssicherheit angestoßen. Gleichzeitig benötigen auch die Automobilhersteller Planungssicherheit beim Rohstoffbezug hinsichtlich Mengen und Kosten, um nicht von den volatilen Marktpreisen am Spotmarkt abhängig zu sein und um die Fahrzeuge zu markt-konformen Preisen anbieten zu können.

Die Kooperation zwischen verarbeitender Industrie und Rohstoffanbietern kann Planungssicherheit auf beiden Seiten hinsichtlich Kosten und Erträgen geben. Investitionsrisiken können minimiert und notwendige Investitionen für den Aufbau von Förderkapazitäten möglicherweise geteilt werden. Außerdem kann die Konformität mit den vom OEM geforderten Umwelt- und Sozialstandards von Anfang an berücksichtigt werden. Erfreulicherweise werden derartige Kooperationen bereits heute umgesetzt, beispielsweise von BMW zusammen mit dem chilenischen Kupferbergbau-Unternehmen Codelco (BMW Group 2018a).

3. Kooperation zwischen verarbeitender Industrie und Recyclingunternehmen

Zum Schließen von Stoffkreisläufen müssen OEM und Recyclingunternehmen in Zukunft enger zusammenarbeiten, um effiziente und wirtschaftliche Recyclingkapazitäten und -strukturen aufzubauen. Gleichzeitig müssen aus einer solchen Kooperation auch Ansätze zum Design der Komponenten entstehen, um deren Recyclingfähigkeit zu verbessern.

Für die Automobilindustrie sind unter anderem die wirtschaftlichen Konditionen für die Entsorgung sowie die Verfügbarkeit und die Preise der wiedergewonnenen Rohstoffe relevant. Gleichermaßen stellen die Materialmengen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt entsorgt werden müssen, eine zentrale Unbekannte für die Recyclingindustrie dar, da sich aus ihnen die notwendigen Investitionen in den erforderlichen Aufbau entsprechender Recyclingkapazitäten und deren wirtschaftlicher Betrieb ableiten. Entsprechend schafft eine vertiefte Abstimmung und Zusammenarbeit Planungs- und Investitionssicherheit auf beiden Seiten. Die Kooperationen bieten außerdem die Möglichkeit, die erforderlichen Strukturen und Ketten des Sammelsystems gemeinsam effizient und wirtschaftlich zu gestalten.

Nicht weniger bedeutend ist das Potenzial durch gemeinsame „Design for Recycling“-Aktivitäten. Die OEM können während der Fahrzeugentwicklung Ansätze ergreifen, um den zukünftigen Recyclingaufwand so gering wie möglich zu gestalten. Hierzu gehört insbesondere die Lösbarkeit von Fügeverbindungen, beispielsweise durch Schraubverbindungen. Auch die Nutzung von Automatisierungs- und Standardisierungspotenzial sowie die Bereitstellung wichtiger Informationen, beispielsweise zu in den Batterien enthaltenen Zelltypen, kann die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit des Recyclingverfahrens deutlich steigern (Öko-Institut 2017).

Wie in Kapitel 8 dargestellt, werden aktuell bereits Kooperationen zwischen Automobilindustrie und Recyclingunternehmen geschlossen, so dass eine Grundlage für die beschriebenen Maßnahmen zunehmend gegeben ist.

4. Politische Maßnahmen zum Schließen der Stoffkreisläufe

Die von der Politik zu setzenden regulatorischen Rahmenbedingungen müssen dazu beitragen, die Kreisläufe der kritischen Rohstoffe zu schließen, um diese dem Recycling zuzuführen und sie erneut nutzbar zu machen. Gleichzeitig muss ein sicherer, umweltverträglicher und effizienter Umgang mit den zu entsorgenden Komponenten gewährleistet sein und unnötige Hürden müssen vermieden werden. Dies kann über entsprechende gesetzliche Regelungen oder definierte Standards erfolgen und muss sowohl das Sammelsystem als auch das Recyclingverfahren abdecken.

Ein wichtiger in diesem Kontext anzuführender Punkt ist die Neugestaltung der Batterierichtlinie (2006/66/EG) (Abschnitt 8.4). In dieser müssen zukünftig Lithium-Ionen-Batterien explizit behandelt werden und spezifische Vorgaben zu den Wiedergewinnungsquoten einzelner Rohstoffe können dazu beitragen, der strategischen Bedeutung der Wiedergewinnung dieser Rohstoffe Rechnung zu tragen (Öko-Institut 2017).

Des Weiteren sollte die Politik dabei helfen, effiziente und wirtschaftliche Sammelsysteme zu etablieren, an denen alle relevanten Unternehmen idealerweise über europäische Landesgrenzen hinweg partizipieren können. Ein sehr interessanter Ansatz mit dem Ziel eines geschlossenen Stoffkreislaufs ist ein Pfand für relevante Fahrzeugkomponenten, ähnlich zum heute existierenden Pfand für Blei-Säure-Batteri-

en in Fahrzeugen, um den unkontrollierten Export der Rohstoffe einzudämmen. Jedoch muss dabei berücksichtigt werden, dass dies zu höheren Kosten entsprechender Fahrzeuge und somit zu einer Verlangsamung ihres Markthochlaufs führen kann.

5. Positive Gestaltung der Lieferkette von Primärrohstoffen

Um Verbesserungen bzw. eine positive Ausgestaltung hinsichtlich ökologischer und ethisch-sozialer Kriterien in der internationalen Lieferkette ausgehend von der Primärrohstoffförderung sicherzustellen, sind sowohl die Politik als auch die beteiligten Unternehmen gefragt. Hierfür stellt die Transparenz entlang der Lieferkette eine essenzielle Grundvoraussetzung dar. Initiativen zur verantwortungsbewussten Rohstoffbereitstellung (Abschnitt 9.7) zielen in aller Regel auf ebendiese ab. Aber auch der staatliche Sektor kann dazu beitragen, die Transparenz entlang der Rohstofflieferketten zu erhöhen: beispielsweise durch die Definition von Standards, durch den Aufbau entsprechender zertifizierter Lieferketten (BGR 2017a, 2017b) oder auch durch staatliche Kontrollen zur Überprüfung der Erzherkunft (siehe Analytical Fingerprint Method der BGR (BGR 2017c)) sowie durch gesetzliche Strafen bei Missachtung der Vorschriften.

In der Diskussion um die negativen Ausprägungen in Lieferketten ist es wichtig zu bedenken, dass Bezugsbeschränkungen, beispielsweise durch ein gesetzlich verordnetes Embargo, keine Besserung der Umstände vor Ort bewirken und somit vermieden werden müssen. Der Rohstoffbezug aus Risikogebieten bietet eine Gelegenheit, durch partnerschaftlichen und fairen Handel nicht nur die Arbeits- und Lebensbedingungen vor Ort, sondern darüber hinaus auch demokratische Strukturen in den Rohstoffländern zu fördern oder zu stärken. Im Kleinbergbau stellen sich die Transparenz und die Gewährleistung von sicheren und positiven Arbeitsbedingungen in diesem Bereich noch schwieriger dar. Geeignete Initiativen im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit helfen, die im Kleinbergbau tätigen Menschen nicht vom Handel auszuschließen und ihre Arbeitsbedingungen substanziell zu verbessern.

Auf Basis der Europäischen Verordnung 2017/821 gelten ab dem Jahr 2021 verbindliche Sorgfaltspflichten für EU-Importeure von Zinn, Tantal, Wolfram und Gold. Die BGR dient in Deutschland als nationale Behörde, um die Einhaltung der

Bestimmungen in Deutschland sicherzustellen. Ein interessanter Vorschlag ist, die verabschiedeten Regelungen auf weitere bedenkliche Rohstoffe, insbesondere auf Kobalt, auszuweiten (Öko-Institut 2017). Diese Idee ist von der europäischen und deutschen Politik zu prüfen, wobei, wie bereits zuvor erwähnt, die Rolle des Kleinbergbaus in besonderer Weise zu berücksichtigen ist.

Neben den politischen Maßnahmen sind Unternehmen in der Pflicht, ihrer unternehmerischen Sozialverantwortung nachzukommen und durch zielführende CSR-Maßnahmen (engl.: Corporate Social Responsibility) die Lebensbedingungen im Umfeld ihrer Aktivitäten positiv zu gestalten. Zu den Ansatzpunkten gehört insbesondere die Verbesserung des Gesundheits- und des Bildungswesens. Darüber hinaus müssen Unternehmen im Rahmen ihres Supply-Chain-Managements ihre Zulieferer dazu verpflichten, entsprechend ökologischen und sozialen Kriterien und Standards zu agieren. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die verantwortungsbewusste Gestaltung der Lieferkette und die Sicherstellung ihrer Einhaltung sehr wahrscheinlich einen gewissen Mehraufwand bedeutet, der sich in höheren Kosten und Preisen für Materialien sowie für die Endprodukte niederschlagen kann.

6. Ganzheitliche Betrachtungen zur Gestaltung des regulatorischen Rahmens

Nullemissionsfahrzeuge wie Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge erfordern zunehmend eine ganzheitliche Betrachtung zur Ausgestaltung des regulatorischen Rahmens durch die Politik.

Aktuell beziehen sich die regulatorischen Vorgaben im Verkehrsbereich in aller Regel auf die Emissionen, die während der Nutzung eines Fahrzeugs verursacht werden. Bei Nullemissionsfahrzeugen verschiebt sich der Schwerpunkt der Emissionsquelle weg von der Fahrzeugnutzung hin zur Bereitstellung der genutzten Energieträger bzw. auch die Produktion der Fahrzeuge verursacht häufig höhere Emissionen als die Herstellung eines konventionellen Verbrennerfahrzeugs. Durch diese Verschiebungseffekte (engl.: burden-shifting) können Verbesserungen an einer Stelle mit Verschlechterungen an einer anderen Stelle direkt verbunden sein und es ist wichtig, dies zu berücksichtigen, um ganzheitliche Verbesserungen zu erzielen. Entsprechend sollte die

Betrachtungsbasis zur Entwicklung regulatorischer Vorgaben vornehmlich die „Well to wheel“-Betrachtung²⁷ oder noch besser die „Cradle to grave“-Betrachtung²⁸ sein.

7. Information und gesellschaftliches Bewusstsein

Die Verfügbarkeit von Informationen zu den relevanten Rohstoffen ist für zahlreiche Akteure wie Unternehmen, Forschungseinrichtungen oder auch die Öffentlichkeit essenziell, um wichtige Bewertungen in diesem Bereich vornehmen zu können. Hierbei sind nicht nur umfassende und belastbare Informationen notwendig, sondern auch die Aktualität der Daten ist wichtig. Aus diesen Gründen muss die Förderung und Finanzierung entsprechender Einrichtungen (zum Beispiel der DERA) durch die öffentliche Hand ausgebaut werden, um die Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigen und aktuellen Informationen zu den vielfältigen Rohstoffen sicherzustellen.

Des Weiteren ist es wichtig, die öffentliche Wahrnehmung und das gesellschaftliche Bewusstsein für die verschiedenen Aspekte zu sensibilisieren, die im Rahmen des Rohstoffbezugs relevant sind. Dies umfasst insbesondere ökologische und soziale Auswirkungen, die mit dem Abbau und der Nutzung der Rohstoffe einhergehen, aber auch versorgungsrelevante Überlegungen. Darauf aufbauend ist es zielführend, wenn Interessenten beim Autokauf nach ökologischen und ethisch-sozialen Standards in Verbindung mit den genutzten Rohstoffen fragen. Dies unterstreicht die Forderung der Öffentlichkeit nach Transparenz und wirkt sich positiv auf die Lieferkette aus.

Ebenso sollte sich ein potenzieller Käufer kritisch mit den unterschiedlichen Kaufoptionen auseinandersetzen und diese mit seinen Anforderungen und Bedürfnissen abgleichen. Hierbei kann beispielsweise die notwendige Größe einer Fahrzeugbatterie hinterfragt werden, die ja bekanntlich erheblich zur Umweltbelastung eines Elektrofahrzeugs beiträgt. Unterstützend sind Politik und Unternehmen gefragt, um den Ausbau von Ladeinfrastruktur, insbesondere zur Schnellladung, voranzutreiben sowie um attraktive, ergänzende Mobilitätsservices anzubieten.

Fazit

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden zahlreiche unterschiedliche Aspekte in Verbindung mit der Rohstoffbereitstellung und -nutzung für Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge beleuchtet. Aufgrund der Relevanz dieser Themen stellen die erforderlichen Rohstoffe und die Überwindung der davon ausgehenden Herausforderungen und Risiken eine Schlüsselrolle für die zukünftige Entwicklung der beiden Fahrzeugtechnologien dar. Sie umfassen vielfältige Themen, wie die Versorgungsstrukturen und den Ausbau von Förderkapazitäten, sich ergebende Versorgungsabhängigkeiten, unerwünschte Marktdynamiken und Preissteigerungen, weitreichende ökologische und soziale Herausforderungen und vieles mehr. Die Wiedergewinnung von Rohstoffen durch Recycling stellt eine große Chance dar, doch auch hierfür müssen die Weichen richtig gestellt werden, um entsprechende Potenziale zu nutzen. All dies wurde im Rahmen der vorliegenden Studie eingehend betrachtet.

Während der Einsatz von Seltenerdmetallen und Kupfer für beide Elektrofahrzeuge wichtig ist, nehmen für die Traktionsbatterien insbesondere Lithium, Kobalt und Nickel eine Schlüsselrolle ein. Deren Versorgung wird, mit Ausnahme von Kobalt, aktuell von einer Reihe von Förderländern sichergestellt. Dagegen basiert die Versorgung mit Platin, das für Brennstoffzellen relevant ist, insbesondere auf Südafrika. Für beide Fahrzeugtechnologien und die dafür notwendigen Rohstoffe existieren zahlreiche Fragen und Herausforderungen, die gelöst werden müssen, um eine positive und dauerhafte Entwicklung der Technologien im Markt sicherzustellen.

Hierbei ist wichtig zu betonen, dass die beiden Fahrzeugtechnologien in Zukunft nebeneinander existieren werden und aufgrund unterschiedlicher technologischer Charakteristik und unterschiedlicher Zielsektoren nicht in direkter Konkurrenz zueinander stehen. Während sich Batterie-Elektrofahrzeuge insbesondere für kurze Fahrstrecken im PKW-Bereich anbieten, sind es vorrangig die Langstreckennutzungen sowie Anwendungen mit hohen Leistungsanforderungen, wie beispielsweise bei Nutzfahrzeugen, in denen der Brennstoffzellenantrieb zielführend eingesetzt werden kann. Werden die angesprochenen Herausforderungen im Zusammenhang mit der Rohstoffnutzung für beide Fahrzeugtechnologien angegangen und mit geeigneten Ansätzen und Strategien gelöst, werden dadurch Risiken vermieden, Entwicklungshemmnisse reduziert und die Akzeptanz der beiden Technologien noch weiter erhöht, so dass sie ihre Vorteile in vollem Maße und global entfalten können.

²⁷ | Mit „Well to wheel“ wird der komplette Bereitstellungspfad des Energieträgers bezeichnet: also beispielsweise die Versorgung mit konventionellen Flüssigkraftstoffen ab der Lagerstätte oder auch die Erzeugung, Verteilung und Bereitstellung von Strom und Wasserstoff.

²⁸ | Eine „Cradle to grave“-Betrachtung beinhaltet im Mobilitätssektor neben dem kompletten Bereitstellungspfad der Energieträger auch die Produktion und Entsorgung des Fahrzeugs unter Berücksichtigung der entsprechenden Materialvorketten. Eine solche Analyse wird durch die Nutzung der Ökobilanzierung (life cycle assessment, LCA) durchgeführt.

Literaturverzeichnis

ACI Systems Alemania GmbH (2018): Bolivien und ACI Systems Alemania gründen Joint Venture zur Gewinnung und Industrialisierung von Lithium. Bolivianisch-deutsche Energie- und Mobilitätsinitiative nimmt Fahrt auf. Online verfügbar unter <http://www.aci-systems.de/press-3.pdf>, zuletzt geprüft am 21.01.2019

Adler, Bernhard (2017): Strategische Metalle – Eigenschaften, Anwendung und Recycling. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=4729548>

AFP, dpa (2012): Rohstoffe: China will Verkauf seltener Erden stärker kontrollieren. Online verfügbar unter <https://www.zeit.de/wirtschaft/2012-04/china-rohstoffe-umweltschutz>, zuletzt aktualisiert am 09.04.2012, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Al Barazi, Siyamend (2018): DERA Präsentation auf dem Industrieworkshop zur Verfügbarkeit von Kobalt für den Industriestandort Deutschland. Berlin, 02.07.2018

Al Barazi, Siyamend; Uwe Näher; Sebastian Vetter; Philip Schütte; Maren Liedtke; Matthias Baier et al. (2017): Kobalt aus der DR Kongo – Potenziale, Risiken und Bedeutung für den Kobaltmarkt. Hannover (Commodity TopNews, 53)

Alta Ley (2018): From copper to innovation. Mining technology roadmap 2035

Altenburg, Sven; Auf der Maur, Alex; Labinski, Alexander; Eckert, Stefan Dr.; Faltenbacher, Michael Dr.; Reuter, Benjamin Dr. (2017): Nullemissionsnutzfahrzeuge. Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative. Hg. v. e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg. Stuttgart

Amnesty international (2016): This Is What We Die For. Human rights abuses in the democratic republic of the Congo power the global trade in cobalt

Anglo American (2012): Hardwiring Sustainability. With the future in mind. Sustainable development report 2012

Anglo American (2015a): Overview of PGM Processing. Presentation by July Ndlovu, 2015

Anglo American (2015b): Platinum. Precious Metals Supply. Presentation by July Ndlovu, 2015

Antofagasta (2013): Copper solution. Mining in Chile. The economist. Online verfügbar unter <https://www.economist.com/business/2013/04/27/copper-solution>, zuletzt geprüft am 06.02.2019

Arafura (2018): Supply and Demand. Article on webpage. Arafura. Online verfügbar unter <https://www.arultd.com/products/supply-and-demand.html>, zuletzt geprüft am 24.01.2019

Argonne National Laboratory (2018): BatPaC: A Lithium-Ion Battery Performance and Cost Model for Electric-Drive Vehicles. Version 3.1 28 June 2018. Online verfügbar unter <http://www.cse.anl.gov/batpac/index.html>, zuletzt geprüft am 10.01.2019

ASI (2019): Members. Overview on webpage. Online verfügbar unter <https://aluminiumstewardship.org/about-asi/current-members/>, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Auswärtiges Amt (2017): Nationaler Aktionsplan. Umsetzung der VN-Leitprinzipien für Wirtschaft und Menschenrechte 2016–2020. Online verfügbar unter <https://www.auswaertiges-amt.de/blob/297434/8d6ab29982767d5a31d2e85464461565/nap-wirtschaft-menschenrechedata.pdf>

Automobilwoche (2018): Risikobehaftete Rohstoffe: Daimler intensiviert Engagement für nachhaltige Lieferketten. Automobilwoche. Online verfügbar unter <https://www.automobilwoche.de/article/20180802/NACHRICHTEN/180809977/risikobehafteterohstoffe-daimler-intensiviert-engagement-fuer-nachhaltige-lieferketten>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2018, zuletzt geprüft am 06.02.2019

Bahadur, Ausha; Kadel, Lisa; Lincoln, Sarah (2017): Platinum for the World Market, Iron Shacks for the Workers. Living and Working Conditions in Marikana Five Years After the Massacre.

Brot für die Welt. Online verfügbar unter https://info.brot-fuer-die-welt.de/sites/default/files/blogdownloads/platinum_for_the_world.final_.pdf, zuletzt geprüft am 05.02.2019

Barker, Jacob (2018): Recruitment in full swing for Indigenous workers at Voisey's Bay mine (Online-Veröffentlichung vom 31.10.2018). Online verfügbar unter <https://www.cbc.ca/news/canada/newfoundland-labrador/labrador-aboriginal-training-partnershiptour-1.4884223>

Barral, Katia; Barthélémy, Heve (2006): Hydrogen high pressure tanks storages: overview and new trends due to H₂ Energy specifications and constraints. Online verfügbar unter <https://www.cder.dz/A2H2/Medias/Download/Proc%20PDF/PARALLEL%20SESSIONS/%5bS12%5d%20Storage%20-%20Gaseous%20Hydrogen/15-06-06/331.pdf>, zuletzt geprüft am 15.01.2019

BBC (2008): Norway blacklists miner Rio Tinto. BBC. Online verfügbar unter <http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/7608097.stm>, zuletzt geprüft am 06.02.2019

BDI (2013): Dodd-Frank Act und „Konfliktmineralien“ Umgang mit Offenlegungspflichten entlang der Lieferkette. Online verfügbar unter https://www.bga.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Geschaeftsbericht/merkblatt-dodd-frankact.pdf

Berkel, Manuel (2013): Abschied von den Seltenen Erden. In: Technology Review 04. Online verfügbar unter <https://www.heise.de/tr/artikel/Abschied-von-den-Seltenen-Erden-1827791.html>, zuletzt geprüft am 29.01.2019

BGR (2014): Platin. Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe

BGR (2017a): Certified Trading Chains. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Min_rohstoffe/CTC/Concept_MC/CTC-Standards-Principles/ctc_standards-principles_node_en.html, zuletzt geprüft am 13.02.2019

BGR (2017b): ICGLR Certification. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Min_rohstoffe/CTC/Concept_MC/RCMMechanism/RCM_mechanism_node_en.html, zuletzt geprüft am 13.02.2019

BGR (2017c): Introduction to the Analytical Fingerprint. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Min_rohstoffe/CTC/Analytical-Fingerprint/analytical_fingerprint_node_en.html, zuletzt geprüft am 29.03.2019

BGR (2018a): Bergbau und Nachhaltigkeit. BGR. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Bergbau_Nachhaltigkeit/bergbau_nachhaltigkeit_node.html, zuletzt geprüft am 15.01.2019

BGR (2018b): EU-Sorgfaltspflichten in Rohstofflieferketten. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/UeberUns/EU-Sorgfaltspflichten/EUsorgfaltspflichten_node.html, zuletzt geprüft am 06.02.2019

BGR (2018c): Preismonitor Oktober 2018

BGR (2019a): DR Congo – Strengthening of control in the mining sector of the DR Congo. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarb/Projekte/Abgeschlossen/Archiv/Afrika/2000_2008-2225-4_Kongo_Kontrolle_Rohstoffsektor_en.html?nn=1572662, zuletzt geprüft am 13.03.2019

BGR (2019b): Mineral Certification at the BGR. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Min_rohstoffe/CTC/Home/CTC_node_en.html, zuletzt geprüft am 13.02.2019

BHP (2017): 2017 Community Partnerships. Coal Australia. Community Projects Report

Biesheuvel, Thomas (2018): Glencore's Congo Unit Halts Sales of Radioactive Cobalt (Online-Veröffentlichung vom 06.11.2018). Online verfügbar unter <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-11-06/glencore-s-congo-unit-katanga-halts-sales-of-radioactive-cobalt>

BMU (2018): President of Chile announces Chile's solar energy strategy. Online verfügbar unter https://www.international-climateinitiative.com/en/news/article/president_of_chile_announces_chile%27s_solar_energy_strategy/, zuletzt aktualisiert am 27.09.2018, zuletzt geprüft am 13.02.2019

BMW Group (2018a): BMW Group and Codelco agree on cooperation to establish the Responsible Copper Initiative. BMW Group. Online verfügbar unter <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0277850EN/bmw-group-and-codelco-agree-on-cooperation-to-establish-the-responsible-copper-initiative?language=en>, zuletzt geprüft am 05.02.2019

BMW Group (2018b): BMW Group, BASF SE, Samsung SDI und Samsung Electronics starten ein branchenübergreifendes Projekt für nachhaltigen Kobalt-Abbau. BMW Group. Online verfügbar unter <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0287779DE/bmw-group-basf-se-samsung-sdi-und-samsung-electronics-starten-ein-branchenuebergreifendes-projekt-fuernachhaltigen-kobalt-abbau>, zuletzt geprüft am 06.02.2019

BMW Group (2018c): BMW Group, Northvolt and Umicore join forces to develop sustainable life cycle loop for batteries. BMW Group. Online verfügbar unter <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0285924EN/bmw-group-northvolt-andumicore-join-forces-to-develop-sustainable-life-cycle-loop-for-batteries?language=en>, zuletzt geprüft am 06.02.2019

BMZ (2019): Südafrika. Globaler Entwicklungspartner im südlichen Afrika. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, BMZ. Online verfügbar unter http://www.bmz.de/de/laender_regionen/subsahara/suedafrika/index.jsp, zuletzt aktualisiert am 07.01.2019, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Bochove, Danielle; Stringer, David (2018): Giant Waste-Spewing Mine Turns Into a Battleground in Indonesia. Bloomberg. Online verfügbar unter <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-06-05/giant-waste-spewing-mine-turns-into-battleground-in-indonesia>, zuletzt geprüft am 06.02.2019

Boddenberg, Sophia (2018): Lithiumabbau in Chile – Fluch oder Segen? (Online-Veröffentlichung vom 28.04.2018). Online verfügbar unter <https://www.dw.com/de/lithiumabbau-in-chile-fluch-oder-segen/a-4340178><https://www.dw.com/de/lithiumabbau-in-chile-fluch-oder-segen/a-43401781>, zuletzt geprüft am 10.01.2019

Bontron, Cécile (2012): Rare-earth mining in China comes at a heavy cost for local villages. The Guardian. Online verfügbar unter <https://www.theguardian.com/environment/2012/aug/07/chinarare-earth-village-pollution>, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Bradshaw, Alex M.; Reuter, Benjamin; Hamacher, Thomas (2013): The Potential Scarcity of Rare Elements for the Energiewende. In: Green 3 (2). DOI: 10.1515/green-2013-0014

Bradsher, Keith (2012): China, Conceding Errors, Vows to Overhaul Rare Earth Metals Industry. The New York Times. Online verfügbar unter <https://www.nytimes.com/2012/06/21/business/global/china-vows-tighter-controls-over-rare-earth-mining.html>, zuletzt geprüft am 06.02.2019

Bradsher, Keith (2013): China Tries to Clean Up Toxic Legacy of Its Rare Earth Riches. The New York Times. Online verfügbar unter <https://www.nytimes.com/2013/10/23/business/international/china-tries-to-clean-up-toxic-legacy-of-rare-earth-riches.html>, zuletzt geprüft am 06.02.2019

Brandenburg, Torsten (2018): Skyrocketing E-Mobility – Challenge for the Supply of Raw Materials? Presentation at the UECT 2018, 2018

British Geological Survey (2009): Cobalt. Definition, mineralogy and deposits

Buchert, Matthias; Jenseit, Wolfgang; Merz, Cornelia; Schüler, Doris (2011a): Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec). Hg. v. Öko-Institut. Darmstadt

Buchert, Matthias; Jenseit, Wolfgang; Merz, Cornelia; Schüler, Doris (2011b): Verbundprojekt: Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungs-batterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBri. Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren. Hg. v. Öko-Institut. Darmstadt

Buchert, Matthias; Manhart, Andreas; Sutter, Jürgen (2014): Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg. Hg. v. Öko-Institut. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/oekodoc/2053/2014-630-de.pdf>

Buchert, Matthias; Sutter, Jürgen (2016a): Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien. Hg. v. Öko-Institut. Darmstadt

Buchert, Matthias; Sutter, Jürgen (2016b): Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien. (Stand 09/2016). Hg. v. Öko-Institut. Darmstadt

Burres, Tim (2016): Benchmarking EV and HEV Technologies. U.S. DOE Vehicle Technologies Office, 07.06.2016

Castilloux, Ryan (2018): Spotlight on Dysprosium. Revving Up for Rising Demand. Adamas Intelligence

Christian Putsch (2013): Anglo-American-Tochter entlässt in Südafrika einen Viertel der Belegschaft. Online-Artikel der NZZ vom 16.01.2013. Online verfügbar unter <https://www.nzz.ch/platinfoerderer-entlaesst-in-suedafrika-einen-viertel-der-belegschaft-1.17941280>

Claasen, Dieter (2004): Der Preis für Kobalt gerät langfristig unter Druck. Online-Artikel im Handelsblatt vom 16.09.2004. Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/finanzen/maerkte/devisen-rohstoffe/china-und-japan-habengroessten-bedarf-der-preis-fuer-kobalt-geraet-langfristig-unter-druck/2401326.html?ticket=ST-1893275-ZpKtTiBy7ftmTddR7wWG-ap3>

Claasen, Dieter (2017): Nickelpreis bricht Rekorde. Online-Artikel vom 10.04.2017. Hg. v. Handelsblatt. Online verfügbar unter <https://www.handelsblatt.com/finanzen/maerkte/devisenrohstoffe/spekulationsgewinne-nickel-preis-bricht-rekorde/2793404.html?ticket=ST-42645-A7TA2XkokwciCfY-VWcl-ap1>

Cobalt Institute (2017): Carcinogenicity. Unter Mitarbeit von Cobalt Institute. Cobalt Institute. Online verfügbar unter <https://www.cobaltinstitute.org/cobalt-and-carcinogenicity.html>, zuletzt aktualisiert am 20.11.2017, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Cobalt Institute (2018): Life Cycle Assessment. Unter Mitarbeit von Cobalt Institute. Cobalt Institute. Online verfügbar unter <https://www.cobaltinstitute.org/life-cycle-assessment.html>, zuletzt aktualisiert am 26.10.2017, zuletzt geprüft am 27.03.2019

Codelco (2018): Sustainability Report 2017. Online verfügbar unter https://www.codelco.com/memoria2017/site/artic/20180312/asocfile/20180312173857/codelco_reporte_sustentabilidad_eng_30102018.pdf

Copper Development Association Inc. (2017): Copper Drives Electric Vehicles. Information sheet. Copper Alliance

Cora Werwitzke (2018): Kongo verdreifacht Lizenzgebühren für den Kobaltabbau. Online-Artikel vom 04.12.2018. Hg. v. electrive.net – Branchendienst für Elektromobilität. Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2018/12/04/kongo-verdreifacht-lizenzgebuehren-fuer-den-kobaltabbau/>

Creagh, Ben (2018): Australia set to move on lithium battery opportunity (Online-Veröffentlichung vom 13.12.2018). Online verfügbar unter <https://www.australianmining.com.au/news/australia-setto-move-on-lithium-battery-opportunity/>

Cummins, Jared (2015): 4 Factors Driving the Price of Platinum. Hg. v. Online-Artikel von CommodityHQ vom 24.06.2015. Online verfügbar unter <https://commodityhq.com/education/fourlittle-known-factors-driving-the-price-of-platinum/>

Daimler AG (2018a): Daimler verstärkt Aktivitäten für eine nachhaltige Rohstofflieferkette und tritt weiteren Initiativen bei. Online verfügbar unter <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko.xhtml?oid=40822365>, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Daimler AG (2018b): Stark für Menschenrechte – Daimler geht in die Offensive für eine nachhaltige Rohstofflieferkette. Online verfügbar unter <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Stark-fuer-Menschenrechte-Daimlergeht-in-die-Offensive-fuer-eine-nachhaltige-Rohstofflieferkette.xhtml?oid=40324774&ls=L2RIL2luc-3RhbmlL2tvLnhdG1sP29pZD00ODM2MjU4JnJlbEIkPTY-wODI5JmZyb21PaWQ9NDgzNjI1OCZib3JkZXJzPXRyd-WUmcmVzdWx0SW5mb1R5cGVJZD00MDYyNiZ2a-WV3VHlwZT10aHVtYnMmc29ydERlZmluaXRpb249UFVC-TEITSEVEX0FULTImYWpheFJlcXVlc3RzTWfKZT0xJnRod-W1iU2NhbGVJbmRleD0wJnJvd0NvdW50c0luZGV4PTU!&rs=40>, zuletzt geprüft am 06.02.2019

- Department of Energy, U.S.A. (2017): Technical Targets for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Components. Online verfügbar unter <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technicaltargets-polymer-electrolyte-membrane-fuel-cell-components>, zuletzt geprüft am 30.01.2019
- DERA (2018): ROSYS – Rohstoffinformationssystem. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Online verfügbar unter <https://rosys.dera.bgr.de/mapapps/resources/apps/rosys/index.html?lang=de>
- Desjardins, Jeff (2015): A Cost Comparison: Lithium Brine vs. Hard Rock Exploration. Visual Capitalist. Online verfügbar unter <https://www.visualcapitalist.com/a-cost-comparison-lithium-brinevs-hard-rock-exploration/>, zuletzt aktualisiert am 02.06.2015, zuletzt geprüft am 18.01.2019
- Deutsches Kupferinstitut (2018): Kupfer. Online verfügbar unter <https://www.kupferinstitut.de/>, zuletzt geprüft am 18.01.2019
- Drive Sustainability (2018a): Material-Change. A STUDY OF RISKS AND OPPORTUNITIES FOR COLLECTIVE ACTION IN THE MATERIALS SUPPLY CHAINS OF THE AUTOMOTIVE AND ELECTRONICS INDUSTRIES. Online verfügbar unter https://drivesustainability.org/wpcontent/uploads/2018/07/Material-Change_VF.pdf
- Drive Sustainability (2018b): Raw materials. Online verfügbar unter <https://drivesustainability.org/raw-materials/>, zuletzt geprüft am 06.02.2019
- Duden (2018): Ethik. Online verfügbar unter <https://www.duden.de/rechtschreibung/Ethik>, zuletzt geprüft am 17.12.2018
- Durit Hartmetall GmbH (2018): Hartmetall von A–Z. Online verfügbar unter <http://www.hartmetall.de/>, zuletzt geprüft am 18.01.2019
- E & MJ (2015): Copper Market Trends Working for Miners. Online verfügbar unter <https://www.emj.com/departments/markets/copper-market-trends-working-for-miners/>, zuletzt geprüft am 13.02.2019
- Eatherley, Dan; Morley, Nicholas (2008): Material security. Ensuring resource availability for the UK economy; strategic report produced by the Resource Efficiency Knowledge Transfer Network, March 2008. Cheshire: C Tech Innovation
- Ebensperger, Arlene; Maxwell, Philip; Moscoso, Christian (2005): The lithium industry. Its recent evolution and future prospects. In: Resources Policy 30 (3), S. 218–231. DOI: 10.1016/j.resourpol.2005.09.001
- Ellingsen, Linda Ager-Wick; Majeau-Bettez, Guillaume; Singh, Bhawna; Srivastava, Akhilesh Kumar; Valøen, Lars Ole; Strømman, Anders Hammer (2014): Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. In: Journal of Industrial Ecology 18 (1), S. 113–124. DOI: 10.1111/jiec.12072
- Elgowainy, Amgad (2012): Life Cycle Analysis of Hydrogen On-Board Storage Options. Argonne National Laboratory
- Erdmann, Lorenz; Behrend, Siegfried (2011): Kritische Rohstoffe für Deutschland. IZT. Berlin
- Eunomix (2016): The impact of platinum mining in Rustenburg. A high-level analysis. Online verfügbar unter https://eunomix.com/cmsAdmin/uploads/eunomix-research_the-impact-of-platinummining-in-rustenburg_march2016_001.pdf
- Eurobat (2019): Recycling. Online verfügbar unter <https://www.eurobat.org/environment-healthsafety/recycling>, zuletzt geprüft am 31.01.2019
- Europäisches Parlament (2000): Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32000L0053>, zuletzt geprüft am 31.01.2019
- Europäisches Parlament (2006): Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32006L0066>, zuletzt geprüft am 31.01.2019
- Europäisches Parlament (2018): Richtlinie 2018/849/EU des Europäischen Parlaments. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0849>, zuletzt geprüft am 31.01.2019
- European Commission (2010): Critical raw materials for the EU
- European Commission (2014): Report on critical raw materials for the EU
- European Commission (2017a): Study on the review of the list of Critical Raw Materials. Non-critical Raw Materials Factsheets. Hg. v. Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs
- European Commission (2017b): Study on the review of the list of Critical Raw Materials. Critical Raw Materials Factsheets. Hg. v. European Commission
- Foy, Henry (2018): Polluter Norilsk Nickel forced to clean up its act. Financial Times. Online verfügbar unter <https://www.ft.com/content/33c5a794-47c6-11e8-8ee8-cae73aab7ccb>, zuletzt geprüft am 14.02.2019
- Frankel, Todd C.; Whoriskey, Peter (2016): Tossed aside in the 'white gold' rush. Indigenous people are left poor as tech world takes lithium from under their feet (Online-Veröffentlichung vom 19.12.2016). Online verfügbar unter <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/tossed-aside-in-the-lithiumrush/?noredirect=on&noredirect=on>
- Gardner, Timothy (2017): UPDATE 1-U.S. Energy Department to develop lithium recycling research center | Agricultural Commodities | Reuters. Reuters. Online verfügbar unter <https://af.reuters.com/article/commoditiesNews/idAFL1N1ZH10B>, zuletzt geprüft am 13.02.2019
- Gehring, Res (2019): Minen-Besuch in Sambia – Cassis hatte doch keinen Kontakt zu lokalen NGOs. SRF. Online verfügbar unter https://www.srf.ch/news/schweiz/minen-besuch-in-sambiacassis-hatte-doch-keinen-kontakt-zu-lokalen-ngos?ns_source=srf_app, zuletzt geprüft am 06.02.2019
- Glöser-Chahoud, Simon; Pfaff, Matthias; Tercero Espinosa, Luis A.; Faulstich, Martin (2016): Dynamische Materialfluss-Analyse der Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium in Deutschland
- Gocht, Werner (1974): Handbuch der Metallmärkte. Erzvorkommen, Metallgewinnung, Metallverwendung, Preisbildung Handelsregelungen
- Graedel, Thomas E.; Allwood, Julian; Birat, Jean-Pierre; Buchert, Matthias; Hagelüken, Christian; Reck, Barbara K. et al. (2011): Recycling Rates of Metals. A Status Report
- Green, Aaron (2017): Cobalt: Out of the Blue. Powering the Next Century. CSA Global, 15.11.2017, zuletzt geprüft am 29.01.2019
- Greene, Jay (2019): Digging for rare earths: The mines where iPhones are born. Online verfügbar unter <https://www.cnet.com/news/digging-for-rare-earth-the-mines-where-iphones-are-born/>, zuletzt geprüft am 05.02.2019
- Grimsrud, Tom K.; Berge, Steinar R.; Haldorsen, Tor; Andersen, Aage (2002): Exposure to Different Forms of Nickel and Risk of Lung Cancer. In: American Journal of Epidemiology (156), S. 1123–1132
- Groth, Julia (2015): Industriemetalle – Preisverfall an vielen Fronten. 3. Teil: Kupfer: Indikator für den Zustand der Weltwirtschaft (Online-Artikel vom 20.01.2015). Online verfügbar unter <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/industrie/preisverfall-bei-oel-nickel-kupferaluminium-und-blei-a-1013746-3.html>, zuletzt geprüft am 15.01.2019
- Grundhoff, Stefan (2018): China verstärkt Batterie-Recycling. Online verfügbar unter <https://www.automobil-produktion.de/hersteller/wirtschaft/china-verstaerkt-batterie-recycling-106.html>, zuletzt geprüft am 13.02.2019
- Guyonnet, Dominique (2018): Rare earth elements and high-tech products. BRGM, CEC4EUROPE
- Hagelüken, Christian (2019): Telefongespräche mit Dr. Christian Hagelüken, Firma Umicore
- Hagelüken, Christian; Buchert, Matthias; Stahl, Hartmut (2005): Stoffströme der Platingruppenmetalle. Systemanalyse und Maßnahmen für eine Nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle. Clausthal-Zellerfeld, Germany: GDMB Medienverlag
- Hagelüken, Christian (2012): Recycling the Platinum Group Metals: A European Perspective (1)
- Hagelüken, Christian (2018): Recycling of Li-Ion batteries – imperative for sustainable e-mobility. advanced automotive battery conference europe. Mainz, 2018

- Home, Andy (2018): COLUMN-Glencore's radioactive shock for the cobalt market (Online-Veröffentlichung vom 09.11.2018). Online verfügbar unter <https://www.reuters.com/article/cobaltglencore-ahome/column-glencores-radioactive-shock-for-the-cobalt-market-andy-homeidUSL8N1XJ949>
- Hörnig, Gabriele (2014): Recycling von NdFeB-Magneten aus elektrischen Antrieben. Projekt MORE
- Horning, Peter (2018): Der Fluch des Kobalts. tagesschau.de. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/inland/kobald-kongo-101.html>, zuletzt aktualisiert am 30.12.2018, zuletzt geprüft am 13.02.2019
- ICMM (2019): Members. Online verfügbar unter <https://www.icmm.com/en-gb/members>, zuletzt geprüft am 13.02.2019
- industriALL (2016): New union challenges the status quo in DR Congo (Online-Artikel vom 19.02.2016). Online verfügbar unter <http://www.industriall-union.org/challenging-the-status-quo-therise-of-tumec>
- International Copper Association (2018): Copper Environmental Profile
- International Copper Study Group (2018): The World Copper Factbook 2018
- International Lead Association (2015): Lead Recycling. Sustainability in action. Online verfügbar unter https://www.ila-lead.org/UserFiles/File/ILA9927%20FS_Recycling_V08.pdf, zuletzt geprüft am 30.01.2019
- IPA (2017): Primary Production of Platinum – Fact Sheet.
- IPA (2018): International Platinum Group Metals Association – LCA Data Access. Online verfügbar unter <https://ipa-news.com/index/sustainability/lca-data-access.html>, zuletzt geprüft am 27.03.2019
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Hg. v. IPCC. Genf, Schweiz
- IRMA (2019): Partners. Online verfügbar unter <https://responsiblemining.net/about/partners/>, zuletzt geprüft am 13.02.2019
- ISEAL (2019): global membership association for credible sustainability standards | ISEAL Alliance. Online verfügbar unter <https://www.isealalliance.org/>, zuletzt geprüft am 27.03.2019
- ITIE (2015): COMITE EXECUTIF DE L'INITIATIVE POUR LA TRANSPARENCE DANS LES INDUSTRIES EXTRACTIVES. Online verfügbar unter https://eiti.org/sites/default/files/migrated_files/rapport_de_conciliation_itie_rdc_2014_-_final.pdf, zuletzt geprüft am 05.02.2019
- Johnson Matthey (2018): PGM Market Report. Supply and Demand in 2017
- Jones, Rodney (2005): An overview of Southern African PGM smelting
- Kaiman, Jonathan (2014): Rare earth mining in China: the bleak social and environmental costs. The Guardian. Online verfügbar unter <https://www.theguardian.com/sustainable-business/rare-earthmining-china-social-environmental-costs>, zuletzt geprüft am 05.02.2019
- Kemper, Anna (2010): Bergleute in Chile: Wer wird Millionär? Zeit Online. Online verfügbar unter <https://www.zeit.de/2010/39/DOS-Chile/komplettansicht>, zuletzt aktualisiert am 27.09.2010, zuletzt geprüft am 13.02.2019
- Kerkow, Uwe; Martens, Jens; Müller, Axel (2012): Vom Erz zum Auto. Abbaubedingungen und Lieferketten im Rohstoffsektor und die Verantwortung der deutschen Automobilindustrie, herausgegeben von MISEREOR, Brot für die Welt und Global Policy Forum Europe
- Kingsnorth, Dudley J. (2018): Rare Earth supply today. Lacking Diversity for Long Term Sustainability. IMCOA
- Korus, Sam (2018): Cobalt Won't Slow Down EV Adoption. Ark Invest. Online verfügbar unter <https://ark-invest.com/research/cobalt-production>, zuletzt geprüft am 05.12.2018
- Kudryavtsev, Pavel (2018): Analysis of the world market of lithium: resources, mining and development prospects. Holon Institute of Technology. Online verfügbar unter <https://www.associationpractice.org/news/analysis-of-the-world-market-of-lithium-resources-mining-and-developmentprospects/>, zuletzt geprüft am 09.11.2018
- Kurzweil, Peter (2016): Brennstoffzellentechnik. Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung. Unter Mitarbeit von Ottmar Schmid. 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-14935-2>
- Kwade, Arno (Hg.) (2018): Recycling of Lithium-Ion Batteries. The LithoRec Way. 1st edition 2018. Cham: Springer International Publishing (Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management). Online verfügbar unter <http://www.springer.com/>
- Lee, Eun Young; Shin, Yi Seul (2018): Copper And Its Electrifying Future. DBS Asian Insights
- Lenson, Barry (2018): How Much Platinum Is in a Catalytic Converter? specialtymetals.com. Online verfügbar unter <http://www.specialtymetals.com/blog/2018/3/12/how-much-platinum-is-in-acatalytic-converter>, zuletzt aktualisiert am 30.01.2019, zuletzt geprüft am 30.01.2019
- Lepan, Nicholas (2018): Infographic: How Much Copper is in an Electric Vehicle? Visual Capitalist. Online verfügbar unter <https://www.visualcapitalist.com/how-much-copper-is-in-an-electric-vehicle/>, zuletzt geprüft am 06.02.2019
- London Metal Exchange (2018): London Metal Exchange webpage. Online verfügbar unter <https://www.lme.com/>, zuletzt geprüft am 30.01.2019
- Luhn, Alec (2016): Where the river runs red: can Norilsk, Russia's most polluted city, come clean? (Online-Veröffentlichung vom 15.09.2016). Online verfügbar unter <https://www.theguardian.com/cities/2016/sep/15/norilsk-red-river-russias-most-polluted-city-clean>
- Marscheider-Weidemann, Frank; Langkau, Sabine; Hummen, Torsten; Erdmann, Lorenz; Tercero Espinoza, Luis Alberto; Angerer, Gerhard et al. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechno-
- logien 2016. Auftragsstudie. Datenstand: März 2016. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (DERA Rohstoffinformationen, 28)
- McKinsey (2010): A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis. The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles
- McKinsey (2017): The future of nickel: A class act. Basic Materials November 2017
- McKinsey (2018): Lithium and Cobalt. A tale of two commodities
- mdr.de (2016): Acht Tote bei Unglück in polnischer Kupfermine. Online verfügbar unter <https://www.mdr.de/heute-im-osten/grubenunglueck-polen-100.html>, zuletzt aktualisiert am 01.12.2016, zuletzt geprüft am 13.02.2019
- Merkel, Wolfgang W. (2012): Seltene Erden im Auto. Welt. Online verfügbar unter https://www.welt.de/print/die_welt/wissen/article13940818/Seltene-Erden-im-Auto.html, zuletzt geprüft am 18.01.2019
- Mining Weekly (2018): Lithium markets to be oversupplied despite EV growth – Moody's. Creamer Media. Online verfügbar unter http://www.miningweekly.com/article/lithium-markets-to-beoversupplied-despite-ev-growth-moodys-2018-11-30/rep_id:3650, zuletzt geprüft am 29.01.2019
- MMSD (2002): Mining for the Future. Appendix J: Grasberg Riverine Disposal Case Study
- Morallo, Audrey (2017): DENR to close 21 mining firms | Philstar.com. Online verfügbar unter <https://www.philstar.com/business/2017/02/02/1668370/denr-close-21-mining-firms>, zuletzt geprüft am 05.02.2019
- Müller, Melanie Reckordt, Michael (2017): Ohne Verantwortung und Transparenz. Menschenrechtliche Risiken entlang der Nickellieferkette. Online verfügbar unter https://www.asienhaus.de/archiv/user_upload/2017_philippinenbuero_Nickel.pdf
- National research council (2008): Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. Washington, D.C.: National Academies Press

- Natural Resources Canada (2018): Nickel facts. Global uses 2017. Natural Resources Canada. Online verfügbar unter <https://www.nrcan.gc.ca/mining-materials/facts/nickel/20519>, zuletzt geprüft am 07.02.2019
- Nickel Consortia (2018): Nickel Matte. Artikel auf Webseite. Online verfügbar unter <http://nickelconsortia.eu/nickel-matte.html>, zuletzt geprüft am 23.01.2019
- Nickel Institute (2012): Nickel Life Cycle Data – Executive Summary
- Nickel Institute (2016a): Nickel Recycling. Online verfügbar unter https://www.nickelinstitute.org/media/2273/nickel_recycling_2709_final_nobleed.pdf, zuletzt geprüft am 30.01.2019
- Nickel Institute (2016b): The Life of Ni. Publication by the Nickel Institute
- Nickel Institute (2018): Nickel: Vorkommen, Gewinnung, Handelsformen, Anwendungsgebiete, Recycling. Unter Mitarbeit von Mark Mistrey. Nickel Institute
- Norilsk Nickel (2017): Norilsk Unveils Major Sustainability and Work Safety Advances for 2016 – Press Releases on CSRwire.com. Online verfügbar unter http://www.csrwire.com/press_releases/40187-Norilsk-Unveils-Major-Sustainability-and-Work-Safety-Advances-for-2016, zuletzt geprüft am 13.02.2019
- Norilsk Nickel (2018): Norilsk Nickel Reports Significant Reduction in Emission of Air Pollutants and Improvements in Labour Health and Safety in 2017. Press release. Online verfügbar unter http://www.csrwire.com/press_releases/41221-Norilsk-Nickel-Reports-Significant-Reduction-in-Emission-of-Air-Pollutants-and-Improvements-in-Labour-Health-and-Safety-in-2017, zuletzt geprüft am 05.02.2019
- Nornickel (2019): Unternehmens-Website. Mission and Principles. Online verfügbar unter <https://www.nornickel.com/sustainability/mission-and-principles/>, zuletzt geprüft am 03.01.2019
- Notter, Dominic A.; Kouravelou, Katerina; Karachalios, Theodoros; Daletou, Maria K.; Haberland, Nara Tudela (2015): Life cycle assessment of PEM FC applications: electric mobility and μ -CHP. In: Energy Environ. Sci. 8 (7), S. 1969–1985. DOI: 10.1039/C5EE01082A
- O.V. (2010): Lagerzyklus treibt den Nickelpreis. Online-Artikel der FAZ vom 09.03.2010. Online verfügbar unter <https://www.faz.net/aktuell/finanzen/devisen-rohstoffe/energie-und-rohstoffelagerzyklus-treibt-den-nickelpreis-1236270.html>
- O.V. (2015): Platin-Preis fällt nach VW-Abgas-Skandal. Online-Artikel vom 23.09.2015. Online verfügbar unter <https://deutsche-wirtschafts-nachrichten.de/2015/09/23/platin-preis-faellt-nach-vwabgas-skandal/>
- Ober, Joyce A. (2003): Lithium. USGS
- Ocean Minerals LLC (2018): Cobalt. Artikel auf Webseite. Online verfügbar unter <https://www.omlus.com/ocean-minerals-llc-cobalt/>, zuletzt geprüft am 18.01.2019
- OICA (2015): PC World Vehicles in Use. Online verfügbar unter <http://www.oica.net/category/vehicles-in-use/>, zuletzt geprüft am 29.01.2019
- OICA (2017): 2017 Production Statistics. Online verfügbar unter <http://www.oica.net/category/production-statistics/>, zuletzt geprüft am 29.01.2019
- Öko-Institut (2016): Ableitung von Recycling- und Umweltauflagen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken bei innovativen Energiespeichern. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ableitung-von-recyclingumweltauflagen>
- Öko-Institut (2017): Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende
- Öko-Institut (2018): Study in support of evaluation of the Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators. Final Report
- orf.at (2014): Bergarbeiter blockieren riesige Mine in Indonesien. ORF. Online verfügbar unter <https://orf.at/v2/stories/2247880>, zuletzt aktualisiert am 01.10.2014, zuletzt geprüft am 06.02.2019
- Pariser, Heinz H. (2017): Nickel. Mehr als nur ein Legierungsmetall. Heinz H. Pariser. Karlsruhe, 27.04.2017
- Pehlken, Alexandra; Albach, Sabine; Vogt, Thomas (2017): Is there a resource constraint related to lithium ion batteries in cars? In: Int J Life Cycle Assess 22 (1), S. 40–53. DOI: 10.1007/s11367-015-0925-4
- Pehlken, Alexandra; Kalverkamp, Matthias; Wittstock, Rikka (2018): Cascade Use in Technologies 2018. Internationale Konferenz zur Kaskadennutzung und Kreislaufwirtschaft – Oldenburg 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg
- Plastics today (2016): Polyamide makes its mark in high-pressure hydrogen tank for Toyota fuel cell vehicle. UBM. Online verfügbar unter <https://www.plasticstoday.com/automotive-and-mobility/polyamide-makes-its-mark-high-pressure-hydrogen-tank-toyota-fuel-cell-vehicle/> 47493150224709, zuletzt geprüft am 06.02.2019
- Powder Metallurgy Review (2017): Chinese industry launches Responsible Cobalt Initiative for action on sustainable cobalt supply. Online verfügbar unter <https://www.pm-review.com/chineseindustry-launches-responsible-cobalt-initiative-action-sustainable-cobalt-supply/>, zuletzt geprüft am 13.02.2019
- PR Newswire (2018): Global and China Cobalt Market Report, 2018–2023 Featuring 5 Chinese & 14 Global Manufacturers. PR Newswire. Online verfügbar unter <https://www.prnewswire.com/newsreleases/global-and-china-cobalt-market-report-2018-2023-featuring-5-chinese-14-global-manufacturers-300747522.html>, zuletzt aktualisiert am 30.03.2019, zuletzt geprüft am 01.04.2019
- PwC (2016): Platinum on a knife-edge. PwC's perspective on trends in the platinum industry. Online verfügbar unter <https://www.pwc.co.za/en/assets/pdf/platinum-perspectives-brochure.pdf>
- Radio Okapi (2014a): Katanga: 15 creuseurs artisanaux morts brûlés dans une galerie souterraine à Kolwezi (Online-Veröffentlichung vom 27.12.2014). Online verfügbar unter <https://www.radiookapi.net/actualite/2014/12/27/katanga-15-creuseurs-artisanaux-morts-brulesdans-une-galerie-souterraine-kolwezi>
- Radio Okapi (2014b): Katanga: 16 creuseurs artisanaux sont morts dans des mines à Kawama (Online-Artikel vom 26.09.2014). Online verfügbar unter <https://www.radiookapi.net/actualite/2014/09/26/katanga-16-creuseurs-artisanaux-sont-morts-dans-des-mines-kawama>
- Radio Okapi (2015): RDC: 13 creuseurs meurent à la recherche du cobalt au Haut-Katanga (Online-Artikel vom 08.09.2015). Online verfügbar unter <https://www.radiookapi.net/2015/09/08/actualite/societe/rdc-13-morts-lors-dun-eboulement-de-terredans-un-nouvelle-mine-de>
- Rankin, W. J. (2011): Minerals, metals and sustainability. Meeting future materials needs. Collingwood, Boca Raton, Fla.: CSIRO Publ; CRC Press
- Reckordt, Michael (2016): Gina Lopez wird es schon richten... Bergbaupolitik und der Nickelabbau unter der Ägide einer Umweltaktivistin. Hg. v. Bonn Südostasienbüro
- Resourcetrade.earth (2016): Copper ores & concentrates. Online verfügbar unter <https://resourcetrade.earth/data?year=2016&category=1403&units=value>, zuletzt geprüft am 18.01.2019
- Responsible Minerals Initiative (2019): Members. Online verfügbar unter <http://www.responsiblemineralsinitiative.org/about/members-and-collaborations/>, zuletzt geprüft am 13.02.2019
- Responsible Steel (2019): Members and Associates. Online verfügbar unter <https://www.responsiblesteel.org/membership/members-and-associates/>, zuletzt geprüft am 13.02.2019
- Reuter, Benjamin (2016): Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten zur Rohstoff- und Technologieauswahl für Elektrofahrzeuge. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
- Reuter, Benjamin; Faltenbacher, Michael; Schuller, Oliver; Whitehouse, Simon; Whitehouse, Nicole (2017): New Bus Refuelling for European Hydrogen Bus Depots. Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling
- Reuters (2010a): China drosselt Export Seltener Erden. Online verfügbar unter <https://www.zeit.de/>

wirtschaft/2010-12/china-erden, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Reuters (2017): Copper demand for electric cars to rise nine-fold by 2027: ICA. Online verfügbar unter <https://www.reuters.com/article/us-copper-demand-electric-vehicles/copper-demand-forelectric-cars-to-rise-nine-fold-by-2027-ica-idUSKBN1940PC>, zuletzt geprüft am 06.02.2019

Reuters, dpa (2010b): Rohstoffe: China drosselt Export Seltener Erden. Zeit Online. Online verfügbar unter <https://www.zeit.de/wirtschaft/2010-12/china-erden>, zuletzt aktualisiert am 29.12.2010, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Romare, Mia; Dahllöf, Lisbeth (2017): The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. IVL Swedish Environmental Research Institute. Online verfügbar unter <https://www.ivl.se/download/18.5922281715bdaebede9559/1496046218976/C243+The+life+cycle+energy+consumption+and+CO2+emissions+from+lithium+ion+batteries+.pdf>, zuletzt geprüft am 05.02.2019

Scheele, Fleur; Nkumba, Emmanuel Umpula; Ben-Bellah, Donat; Bwenda, Christian (2016): Cobalt blues. Environmental pollution and human rights violations in Katanga's copper and cobalt mines. Online verfügbar unter <https://www.somo.nl/wp-content/uploads/2016/04/Cobalt-blues.pdf>

Schmidt, Michael (2015): Rohstoffrisikobewertung – Platingruppenmetalle. Platin, Palladium, Rhodium. Datenstand: Dezember 2014. Berlin: DERA (DERA Rohstoffinformationen, 26)

Schmidt, Michael (2017): Rohstoffrisikobewertung – Lithium. DERA Rohstoffinformation Nr. 33. Hg. v. DERA – Deutsche Rohstoffagentur. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Berlin

Schüler, Doris Dr.; Buchert, Matthias Dr.; Liu, Ran; Dittrich, Stefanie; Merz, Cornelia (2011): Study on Rare Earths and Their Recycling. Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament. Hg. v. Öko-Institut. Darmstadt

Schwarzer, Christoph M. (2019): Mythos Sondermüll: Batterie-Recycling funktioniert! – electrive.net. Online verfügbar unter <https://www.electrive.net/2019/01/16/mythos-sondermuellbatterie-recycling-funktioniert/>, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Scott, Willie (2017): Choosing a Copper Recycle Method and the Specific Processes Involved. Online verfügbar unter <https://www.brighthub.com/environment/green-living/articles/66929.aspx>, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Shaping Sustainable Markets (2018): International Council on Mining and Metals (ICMM) Sustainable Development Framework. Online verfügbar unter <https://shapingsustainablemarkets.iied.org/international-council-mining-and-metals-icmm-sustainable-development-framework>, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Spinnarke, Sabine (2015): Aluminium – eine gefährliche Versuchung. Produktion. Online verfügbar unter <https://www.produktion.de/trends-innovationen/aluminium-eine-gefaehrliche-versuchung-126.html>, zuletzt geprüft am 06.02.2019

Stahl, H.; Baron, Yiffat; Hay, Diana; Hermann, Andreas; Mehlhart, Georg; Baroni, Laura et al. (2018): Study in support of evaluation of the Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators. Final Report. Hg. v. European Commission – DG Environment A.2

Stoddard, Ed (2018): South Africa's east platinum belt hit by over 400 social unrest incidents since 2016 (Online-Veröffentlichung vom 10.04.2018). Online verfügbar unter <https://www.reuters.com/article/us-safrica-mining-unrest/south-africas-east-platinum-belt-hit-by-over-400-social-unrest-incident-since-2016-idUSKBN1HH20R>

Süddeutsche Zeitung (2013): San-José-Mine in Chile soll verkauft werden. Süddeutsche Zeitung. Online verfügbar unter <https://www.sueddeutsche.de/panorama/drei-jahrenach-grubenunglueck-san-jose-mine-in-chile-soll-verkauft-werden-1.1738867>, zuletzt geprüft am 13.02.2019

The Guardian (2019): Tshisekedi calls for 'a Congo for all' after disputed election. The Guardian. Online verfügbar unter <https://www.theguardian.com/world/2019/jan/24/tshisekedi-calls-for-a-congo-for-all-after-disputed-election>, zuletzt geprüft am 05.02.2019

thinkstep AG (2018a): GaBi LCI Databases. Hg. v. thinkstep AG

thinkstep AG (2018b): Hydrogen For Innovative Vehicles (HyFive). Final Project report

Treffer, Paul; Spurk, Paul (2018): Sustainable Resource Management for Lithium-Ion-Batteries. Presentation. Ulm, 2018

Trueb, Lucien F. (2005): Die chemischen Elemente. Ein Streifzug durch das Periodensystem. 2., überarb. und erg. Aufl. Stuttgart: Hirzel

UBA (2016): Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2016

UBS Limited (2017): UBS Evidence Lab Electric Car Teardown – Disruption Ahead? Hg. v. UBS Evidence Lab. Online verfügbar unter <https://neo.ubs.com/shared/d1wkuDIEbYPjF/>, zuletzt geprüft am 29.01.2019

UD (2018): Elektromobilität und Batterierecycling: Ist China der EU einen Schritt voraus? Online verfügbar unter <https://www.umweltdialog.de/de/politik/weltweit/2018/Elektromobilitaet-und-Batterierecycling-Ist-China-der-EU-einen-Schritt-voraus.php>, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (2010). Chichester: Wiley. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1002/14356007>

United States Geological Survey (2003): Mineral Commodity Summaries 2003. Hg. v. United States Geological Survey. Reston, VA. Online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2003/mcs2003.pdf>, zuletzt geprüft am 23.01.2019

United States Geological Survey (2010): Mineral Commodity Summaries 2010. Hg. v. United States Geological Survey. Online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2010/mcs2010.pdf>, zuletzt geprüft am 23.01.2019

United States Geological Survey (2011): Mineral Commodity Summaries 2011. Hg. v. United States Geological Survey. Reston, VA. Online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2011/mcs2011.pdf>, zuletzt geprüft am 23.01.2019

United States Geological Survey (2015): Mineral Commodity Summaries 2015. Hg. v. United States Geological Survey. Reston, VA. Online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2015/mcs2015.pdf>, zuletzt geprüft am 23.01.2019

United States Geological Survey (2016): Mineral Commodity Summaries 2016. Hg. v. United States Geological Survey. Reston, VA. Online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf>, zuletzt geprüft am 23.01.2019

gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf, zuletzt geprüft am 23.01.2019

United States Geological Survey (2018): Mineral Commodity Summaries 2018. (Place of publication not identified.) Online verfügbar unter <https://www.worldcat.org/title/mineral-commodities-summary-2018/oclc/1031344968?ap=citavi>, zuletzt geprüft am 15.01.2019

United States Geological Survey (2018a): Mineral Commodity Summaries. Nickel. Online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/nickel/mcs-2018-nicke.pdf>

United States Geological Survey (2018b): Minerals Information: Commodity Statistics and Information. Online verfügbar unter <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>, zuletzt geprüft am 30.01.2019

Vale (2018a): Community Support. Online verfügbar unter <http://www.vale.com/canada/EN/aboutvale/communities/community-support/Pages/default.aspx>, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Vale (2018b): Vale scores higher in Human Rights ranking (Online-Veröffentlichung vom 22.11.2018). Online verfügbar unter <http://www.vale.com/brasil/en/aboutvale/news/pages/valedestaque-entre-empresas-melhor-desempenho-direitos-humanos.aspx>, zuletzt geprüft am 03.01.2019

VDI (2018): VDI-Richtlinie 4800. Blatt 2

Volkswagen (2017): Volkswagen verstärkt Regeln für eine nachhaltige und soziale Rohstoffbeschaffung. Online verfügbar unter <https://www.volkswagennewsroom.com/de/pressemitteilungen/volkswagen-verstaerkt-regeln-fuer-eine-nachhaltige-undsoziale-rohstoffbeschaffung-469>, zuletzt geprüft am 06.02.2019

Voncken, Jakobus Hubertus Lambertus (2016): The rare earth elements. An introduction. Cham: Springer (SpringerBriefs in earth sciences)

Webb, Adam (2018): Nickel Supply Energized By Electric Vehicles. S&P Global. Online verfügbar unter <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/research/nickel-supplyenergized-by-electric-vehicles>, zuletzt geprüft am 13.02.2019

websiteswithname.com (2019): How Much Platinum/ Palladium/Rhodium in Catalytic Converters – And Approximate Worth. Online verfügbar unter <https://www.websiteswithname.com/2015/10/how-much-platinum-palladium-rhodium-in.html>, zuletzt aktualisiert am 30.01.2019, zuletzt geprüft am 30.01.2019

Welt (2019): Noch ein Minenarbeiter nach Grubenunglück in Polen vermisst. welt.de. Online verfügbar unter <https://www.welt.de/vermisstes/article187929564/Bei-Breslau-Noch-ein-Minenarbeiter-nach-Grubenunglueck-in-Polen-vermisst.html>, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Widmer, James D.; Martin, Richard; Kimiabeigi, Mohammed (2015): Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. In: Sustainable Materials and Technologies 3, S. 7–13. DOI: 10.1016/j.susmat.2015.02.001

Wiener Umwelthanwaltschaft (2018): In-situ-Laugung. Online verfügbar unter <http://wua-wien.at/atomschutz/glossar-zumthema/8830-situ-laugung>, zuletzt geprüft am 23.01.2019

Wilson, Tom (2018): Glencore Faces Off Against Labor Group on Congo Mine Conditions (Online-Artikel vom 23.03.2018). Online verfügbar unter <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-03-23/glencore-faces-off-against-labor-group-on-congo-mine-conditions>

Wilts, Henning; Mainguy, Gaëll; Bleischwitz, Raimund (2011): Combating Material Leakage: a Proposal for an International Metal Covenant. In: Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society 4

Wittstock, Rikka; Pehlken, Alexandra; Wark, Michael (2016): Challenges in Automotive Fuel Cells Recycling. In: Recycling 1 (3), S. 343–364. DOI: 10.3390/recycling1030343

World Bank (2017): The Worldwide Governance Indicators (WGI) project. Produced by Daniel Kaufmann and Aart Kraay. Online verfügbar unter <http://info.worldbank.org/governance/wgi/index.aspx#home>, zuletzt geprüft am 25.01.2019

WTO (2015): DS431: China. Measures Related to the Exportation of Rare Earths, Tungsten and Molybdenum (Online-Veröffentlichung vom 20.05.2015). Online verfügbar unter https://www.wto.org/english/tratop_e/dispu_e/cases_e/ds431_e.htm

Wurster, Reinhold (2018): The Impact of Fuel Cell and Battery Electric Vehicles on Critical Materials, Cost and Energy Supply. LBST. Ulm, 13.11.2018

ZDF Mediathek (2018): Der wahre Preis der Elektroautos. Online-Videobeitrag. ZDF. Online verfügbar unter <https://www.zdf.de/dokumentation/planet-e/planet-e-der-wahre-preis-derelektroautos-100.html>, zuletzt geprüft am 13.02.2019

Zeit Online (2015): China beseitigt Exportschranken für Seltene Erden. Online verfügbar unter <https://www.zeit.de/wirtschaft/2015-01/china-export-seltene-erden>, zuletzt geprüft am 22.01.2018

Zukowski, Dan (2016): Russia's Red River Another Sad Chapter for One of the Most Polluted Cities on Earth (Online-Veröffentlichung vom 13.09.2016). Online verfügbar unter <https://www.ecowatch.com/russian-red-river-nickel-pollution-2003870142.html>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 0-1:	Ergebnisdarstellung der Kritikalitätsanalyse von Rohstoffen für Batterie- (BEV) und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV)	8
Abbildung 0-2:	Ergebnisdarstellung der Kostenbeiträge und der THG-Emissionen durch die Gewinnung der betrachteten Rohstoffe	11
Abbildung 3-1:	Darstellung der Antriebe von Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen	24
Abbildung 3-2:	Schematische Darstellung einer Lithium-Ionen-Batterie	26
Abbildung 3-3:	Exemplarische Darstellung einer MEA in einer PEMFC inklusive der Bipolarplatten	27
Abbildung 3-4:	Schematische Darstellung von PSM und ASM	28
Abbildung 3-5:	Folgenschwere und Versorgungsrisiko der untersuchten Rohstoffe für Batterie- (BEV) und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV)	34
Abbildung 3-6:	Versorgungsrisiko und wirtschaftliche Bedeutung verschiedener Rohstoffe	36
Abbildung 4-1:	Endnutzung von Lithium im Jahr 2015	42
Abbildung 4-2:	Endnutzung von Kobalt im Jahr 2016	44
Abbildung 4-3:	Endnutzung von Nickel im Jahr 2017	46
Abbildung 4-4:	Endnutzung von Platin im Jahr 2014	48
Abbildung 4-5:	Endnutzung von Seltenerdmetallen im Jahr 2016	50
Abbildung 4-6:	Endnutzung von Kupfer (Durchschnitt der Jahre 2010–2014)	52
Abbildung 5-1:	Schematische Darstellung der unterschiedlichen Einteilungen der verfügbaren Rohstoffmengen	57
Abbildung 5-2:	Gegenüberstellung der Entwicklung von Förderung und wirtschaftlich abbaubaren Reserven von Lithium..	58
Abbildung 5-3:	Gegenüberstellung der Entwicklung von Förderung und wirtschaftlich abbaubaren Reserven für Kobalt	60
Abbildung 5-4:	Gegenüberstellung der Entwicklung von Förderung und wirtschaftlich abbaubaren Reserven für Nickel	62
Abbildung 5-5:	Gegenüberstellung der Entwicklung von Förderung und wirtschaftlich abbaubaren Reserven für Nickel aus sulfidischen Erzen	64
Abbildung 5-6:	Gegenüberstellung der Entwicklung von Förderung und wirtschaftlich abbaubaren Reserven für PGM	66
Abbildung 5-7:	Gegenüberstellung der Entwicklung von Förderung und wirtschaftlich abbaubaren Reserven für SEO	68
Abbildung 5-8:	Gegenüberstellung der Entwicklung von Förderung und wirtschaftlich abbaubaren Reserven für Kupfer	70
Abbildung 6-1:	Historische Preisentwicklung für Lithium 1995–2015	75
Abbildung 6-2:	Aktuelle Preisentwicklung für Lithiumcarbonat 2016–2018	75
Abbildung 6-3:	Cash-Cost-Verteilung der wichtigsten Lithiumproduzenten 2016	76
Abbildung 6-4:	Kostenanteile bei der Lithiumgewinnung aus Sole und aus Festgestein 2015	77
Abbildung 6-5:	Lithiumangebot und -nachfrage, aktuell und künftig	78
Abbildung 6-6:	Historische Preisentwicklung für Kobalt 1995–2015	79
Abbildung 6-7:	Aktuelle Preisentwicklung für Kobalt 2016–2018	80
Abbildung 6-8:	Kobaltangebot und -nachfrage, aktuell und künftig	81

Tabellenverzeichnis

Abbildung 6-9:	Historische Preisentwicklung für Nickel 1995–2015	82	Tabelle 3-1:	Spezifische und gemeinsame Kernkomponenten der beiden Fahrzeugkonzepte (exemplarische Auflistung)	25
Abbildung 6-10:	Aktuelle Preisentwicklung für Nickel 2016–2018	82	Tabelle 3-2:	Verwendung von unterschiedlichen Materialien für Kathode und Anode in BEV	26
Abbildung 6-11:	Class-I-Nickel, Angebot und Nachfrage, aktuell und zukünftig	83	Tabelle 3-3:	Kategorisierung der technischen Folgeschwere nach VDI 4800	30
Abbildung 6-12:	Historische Preisentwicklung für PGM 1995–2015	84	Tabelle 3-4:	Betrachtung der Rohstoffe anhand der Indikatoren zur Quantifizierung des Versorgungsrisikos	31
Abbildung 6-13:	Historische Preisentwicklung für Platin 1995–2015	85	Tabelle 3-5:	Schlüssel zur Vergabe der Werte von 0 bis 1 anhand der vorher ermittelten Indikatoren	32
Abbildung 6-14:	Aktuelle Preisentwicklung für Platin 2016–2018	86	Tabelle 3-6:	Zahlenwerte der Indikatoren und Gesamtergebnis für das Versorgungsrisiko für jeden Rohstoff, ermittelt mittels degressiver Addition	32
Abbildung 6-15:	Historische Preisentwicklung für Seltenerdmetalle 1995–2015	87	Tabelle 3-7:	Zahlenwerte der Indikatoren und Gesamtergebnis für die Folgeschwere für jeden Rohstoff, ermittelt mittels degressiver Addition	33
Abbildung 6-16:	Aktuelle Preisentwicklung für Neodym 2016–2018	88	Tabelle 3-8:	Anhand der Kritikalitätsuntersuchung ausgewählte Rohstoffe	35
Abbildung 6-17:	Aktuelle Preisentwicklung für Dysprosium 2016–2018	89	Tabelle 4-1:	Beispiele für Minerale mit Lithiumgehalt	41
Abbildung 6-18:	Historische Preisentwicklung für Kupfer 1995–2015	90	Tabelle 4-2:	Wichtigste Förderländer für Lithium	41
Abbildung 6-19:	Aktuelle Preisentwicklung für Kupfer 2016–2018	91	Tabelle 4-3:	Wichtigste Förderländer für Kobalt	43
Abbildung 7-1:	Primärenergiebedarf und THG-Emissionen infolge der Bereitstellung von 1 kg Lithiumcarbonat	98	Tabelle 4-4:	Wichtigste Förderländer/-regionen für Nickel	45
Abbildung 7-2:	Primärenergiebedarf und THG-Emissionen infolge der Bereitstellung von 1 kg Kobalt	99	Tabelle 4-5:	Wichtigste Förderländer für Platin	47
Abbildung 7-3:	Primärenergiebedarf und THG-Emissionen infolge der Bereitstellung von 1 kg Nickel	100	Tabelle 4-6:	Wichtigste Förderländer für Seltenerdmetalle	49
Abbildung 7-4:	Primärenergiebedarf und THG-Emissionen infolge der Bereitstellung von 1 kg Platin	101	Tabelle 4-7:	Wichtigste Förderländer für Kupfer	51
Abbildung 7-5:	Primärenergiebedarf und THG-Emissionen infolge der Bereitstellung von 1 kg SEE (für Magnet-Mischung)	102	Tabelle 8-1:	Darstellung globaler Werte (nach verschiedenen Quellen) für Recycled Content und EoL Recycling Rate für die als kritisch identifizierten Rohstoffe aus heutiger globaler Perspektive	108
Abbildung 7-6:	Primärenergiebedarf und THG-Emissionen infolge der Bereitstellung von 1 kg Kupfer	103	Tabelle 9-1:	Politische Bedingungen – WGI der Weltbank für die Top-4-Lithiumabbauländer (Referenzjahr 2017)	122
Abbildung 8-1:	Schematische Darstellung der Stoffflüsse beim Recycling	107	Tabelle 9-2:	Politische Bedingungen – WGI der Weltbank für die Top-4-Kobaltabbauländer (Referenzjahr 2017)	124
Abbildung 8-2:	Schematische Darstellung von Aufwand, Emissionen und anderen Umweltauswirkungen in Abhängigkeit von der Recyclingquote	109	Tabelle 9-3:	Politische Bedingungen – WGI der Weltbank für die Top-4-Nickelabbauländer (Referenzjahr 2017)	126
Abbildung 8-3:	Schematische Darstellung des LiBRi-Recyclingprozesses	111	Tabelle 9-4:	Politische Bedingungen – WGI der Weltbank für die Top-4-Platinabbauländer (Referenzjahr 2017)	127
Abbildung 10-1:	Typische Anteile von Komponenten und Materialien in der Batterie eines BEV	141	Tabelle 9-5:	Politische Bedingungen – WGI der Weltbank für die Top-4-Seltenerdmetall-Abbauländer (Referenzjahr 2017)	128
Abbildung 10-2:	Kostenbeiträge für die als kritisch identifizierten Rohstoffe in BEV und FCEV	143	Tabelle 9-6:	Politische Bedingungen – WGI der Weltbank für die Top-8-Kupferabbauländer (Referenzjahr 2017)	131
Abbildung 10-3:	Gegenüberstellung des Primärenergiebedarfs für die als kritisch identifizierten Rohstoffe in BEV und FCEV ..	143	Tabelle 9-7:	Übersicht zu Rohstoffinitiativen	132
Abbildung 10-4:	Gegenüberstellung der THG-Emissionen für die als kritisch identifizierten Rohstoffe in BEV und FCEV	144	Tabelle 10-1:	Abschätzung des Materialbedarfs für BEV und FCEV	142
			Tabelle 10-2:	Preise für die als kritisch identifizierten Rohstoffe zum Jahresende 2018	142
			Tabelle 10-3:	Theoretischer jährlicher Bedarf (absolut) der als kritisch identifizierten Rohstoffe und das Verhältnis dieses Bedarfs zur aktuellen Fördermenge für 25 % Anteil an der jährlichen Fahrzeugproduktion	145
			Tabelle 10-4:	Theoretischer Gesamtbedarf (absolut) der als kritisch identifizierten Rohstoffe und das Verhältnis dieses Bedarfs zu den heutigen wirtschaftlich abbaubaren Reserven für eine Umstellung von 25 % der globalen PKW-Flotte	146

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr (Abkürzung a=annus)	ELCD	European Life Cycle Database	Li	Lithium	PGM	Platingruppenmetalle
ADP	Abiotisches Ressourcenverbrauchspotenzial (engl.: Abiotic Depletion Potential)	EoL	End of Life	LKW	Lastkraftwagen	PKW	Personenkraftwagen
AFC	Alkalische Brennstoffzelle (engl.: Alkaline Fuel Cell)	EoL-RR	End-of-Life-Recyclingquote (engl.: End-of-Life Recycling Rate)	LME	Londoner Metallbörse (engl.: London Metal Exchange)	POCP	Sommersmogpotenzial (engl.: Photochemical Ozone Creation Potential)
Al	Aluminium	EP	Überdüngungspotenzial (engl.: Eutrophication Potential)	LMO	Lithium-Mangan-Oxid-Batterie (engl.: Lithium Manganese Oxide Battery)	ppm	Millionstel (engl.: parts per million)
AP	Versauerungspotenzial (engl.: Acidification Potential)	EU	Europäische Union	LOHC	Flüssige organische Wasserstoffträger (engl.: Liquid Organic Hydrogen Carriers)	PSM	Permanenterregter Synchronmotor
ASM	Asynchronmotor	EV	Elektrofahrzeug (engl.: Electric Vehicle)	MEA	Membran-Elektroden-Einheit (engl.: Membrane Electrode Assembly)	Pt	Platin
B	Bor	Fe	Eisen	MJ	Megajoule	RC	Recyclinganteil (engl.: Recycled Content)
BEV	Batterie-Elektrofahrzeug (engl.: Battery Electric Vehicle)	FCEV	Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug (engl.: Fuel Cell Electric Vehicle)	Mt	Megatonne (= 1.000.000 t)	ROSYS	Rohstoffinformationssystem der DERA
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	FuE	Forschung und Entwicklung	N ₂ O	Lachgas	SCR	Selektive katalytische Reduktion (engl.: Selective Catalytic Reduction)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung	NCA	Nickel-Kobalt-Aluminium-Batterie (engl.: Nickel Cobalt Aluminium Battery)	SE	Seltene Erden
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit	GHG	Treibhausgas (engl.: Greenhouse Gas)	Nd	Neodym	SEE	Seltenerdmetalle
BMW	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie	GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit	NdFeB	Neodym-Eisen-Bor	SEM	Seltenerdmetalle
BZ	Brennstoffzelle	GJ	Gigajoule	Ni	Nickel	SEO	Seltenerdoxide
C	Kohlenstoff	GWP	Treibhausgaspotenzial (engl.: Global Warming Potential)	NMC	Nickel-Mangan-Kobalt-Kathode (engl.: Nickel Manganese Cobalt Cathode)	SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
CCCMC	Chinesische Handelskammer für Metall-, Mineralien- sowie Chemikalien-Im- und Export (engl.: China Chamber of Commerce of Metals, Minerals & Chemicals Importers & Exporters)	H ₂ bzw. H ₂	Molekularer Wasserstoff	NMOC	Nichtmethanhaltige flüchtige organische Verbindung (engl.: Non-Methane Volatile Organic Compound)	SO ₂	Schwefeldioxid
CH ₄	Methan	HDPE	Hart-Polyethylen (engl.: High-Density Polyethylene)	NMVO	Nichtmethanhaltige flüchtige organische Verbindung (engl.: Non-Methane Volatile Organic Compound)	SRM	Geschalteter Reluktanzmotor (engl.: Switched Reluctance Motor)
CI	Cobalt Institute	HHI	Herfindahl-Hirschman-Index	NPI	Nickel Pig Iron	SQM	Sociedad Química y Minera de Chile
CML	Centre of Environmental Science at Leiden University	ICA	International Copper Association	ODP	Ozonabbau-potenzial (engl.: Ozone Depletion Potential)	THG	Treibhausgas
CO	Kohlenmonoxid	ICMM	International Council on Mining and Metals	OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (engl.: Organisation for Economic Co-operation and Development)	UBA	Umweltbundesamt
Co	Kobalt	ICSG	International Copper Study Group	OEM	Erstausrüster (engl.: Original Equipment Manufacturer; dt.: Originalgerätehersteller)	UN	Vereinte Nationen (engl.: United Nations)
CO ₂	Kohlendioxid	ILCD	International Life Cycle Data System	OICA	Internationale Automobilherstellervereinigung (franz.: Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles)	UNEP	Umweltprogramm der Vereinten Nationen (engl.: United Nations Environment Programme)
CO ₂ -eq.	CO ₂ -Äquivalent (engl.: CO ₂ equivalent)	IPA	International Platinum Group Metals Association	OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (engl.: Organisation for Economic Co-operation and Development)	UNESCO	Organisation der Vereinten Nationen für Bildung, Wissenschaft und Kultur (engl.: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)
CSR	Unternehmerische Sozialverantwortung (engl.: Corporate Social Responsibility)	IRMA	Initiative for Responsible Mining Assurance	OEM	Erstausrüster (engl.: Original Equipment Manufacturer; dt.: Originalgerätehersteller)	UNICEF	Kinderhilfswerk der Vereinten Nationen (engl.: United Nations International Children's Emergency Fund)
CTC	Certified Trading Chains	ISEAL	International Social and Environmental Accreditation and Labelling Alliance	OICA	Internationale Automobilherstellervereinigung (franz.: Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles)	U.S./US	Vereinigte Staaten von Amerika (engl.: United States)
Cu	Kupfer	ISO	Internationale Organisation für Normung (engl.: International Organization for Standardization)	PA	Polyamid	USGS	United States Geological Survey
DBS	Development Bank of Singapore	KEA	Kumulierter Energieaufwand	PAFC	Phosphorsäure-Brennstoffzelle (engl.: Phosphoric Acid Fuel Cell)	VDI	Verein Deutscher Ingenieure
DERA	Deutsche Rohstoffagentur	kt	Kilotonne (= 1.000 t)	PAL	Pressure Acid Leach-Technik	VOC	Flüchtige organische Verbindung (engl.: Volatile Organic Compound)
DMFC	Direktmethanol-Brennstoffzelle (engl.: Direct Methanol Fuel Cell)	kW	Kilowatt	PAN	Polyacrylnitril	WGI	Worldwide Governance Indicators
DR	Demokratische Republik	kWh	Kilowattstunde	Pd	Palladium	WTO	Welthandelsorganisation (engl.: World Trade Organization)
Dy	Dysprosium	LCA	Ökobilanz (engl.: Life Cycle Assessment)	PED	Primärenergiebedarf (engl.: Primary Energy Demand)	ZAR	Südafrikanischer Rand
EE	Erneuerbare Energien	LCI	Sachbilanz (engl.: Life Cycle Inventory)	PEMFC	Protonenaustauschermembran- Brennstoffzelle (engl.: Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	ZDF	Zweites Deutsches Fernsehen
		LCIA	Wirkungsabschätzung (engl.: Life Cycle Impact Assessment)				
		LFP	Lithium-Eisen-Phosphat-Batterie (engl.: Lithium Iron Phosphate Battery)				

Anhang – Experteninterviews

Der standardisierte Fragebogen (Kapitel 2) wurde 18-mal verschickt, es erfolgten 13 Rückläufe, teilweise oder auch vollständig beantwortet. Einige der Experten haben der Nennung ihrer Person oder Einrichtung zugestimmt und sind daher in folgender Tabelle dargestellt.

Einrichtung	Befragter Experte
BMW Group	---
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Forschungsgruppe Cascade Use	Dr.-Ing. Alexandra Pehlken, Gruppenleiterin
Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	Michael Schmidt, wissenschaftlicher Mitarbeiter
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	Dr. Jens Mitzel, wissenschaftlicher Mitarbeiter Dr. Indro Biswas, wissenschaftlicher Mitarbeiter
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE	Ulf Groos, Abteilungsleiter Brennstoffzellensysteme
Freudenberg Sealing Technologies	Peter Kritzer, Senior Application Manager Battery & Energy Storage Systems
Recharge, The European Association of Advanced Rechargeable and Lithium Batteries	Claude Chanson, General Manager
Umicore AG & Co. KG	Dr. Ralf Zuber, Director EU Government Affairs Dr. Christian Hagelüken, Senior Project Manager
Wystrach GmbH NPROXX Jülich GmbH	---
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg	---

Neben der Bewertung der Folgeschwere (Kapitel 2) konnte auch die Auswahl der relevanten Technologien bestätigt werden. Nebenher in allen erhaltenen Antworten werden Li-Ionen-Batterien mit Nickel-Mangan-Kobalt-Kathode in Kombination mit einer graphitbasierten Anode (ggfs. mit Siliziumdotierung) als die vielversprechendste Technologie für Batterie-Elektrofahrzeuge angesehen. Feststoffbatterien werden erst langfristig (nicht vor 2030) in Serienreife für PKW erwartet.

Hinsichtlich der verfügbaren Brennstoffzellen wird eindeutig die PEM-Brennstoffzelle als die vielversprechendste Technologie bestätigt. Auch hinsichtlich der H₂-Speichersysteme sind sich die Befragten einig, dass Druckspeicher (tendenziell mit einem Druckniveau bei 700 bar) die vielversprechendste Technologie darstellen und alternative Speichersysteme (kryogene H₂-Speicherung, Metallhydrid oder über organische Medien) nicht in näherer Zukunft Anwendung finden werden.

Impressum

Herausgeber

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue
Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg

Autoren

thinkstep AG:
Dr.-Ing. Benjamin Reuter, Aline Hendrich, Jasmin Hengstler,
Stefan Kupferschmid, Markus Schwenk

Qualitätssicherung

thinkstep AG:
Dr.-Ing. Johannes Gediga

Redaktion und Koordination der Studie

e-mobil BW GmbH
Isabell Knüttgen, Dr. Manuel C. Schaloske, Ida Stanglmayr

Layout/Satz/Illustration

markentrieb
Die Kraft für Marketing und Vertrieb

Fotos

Umschlag: Denis Zhitnik/shutterstock
Die Quellennachweise aller weiteren Bilder befinden
sich auf der jeweiligen Seite.

Druck

Karl Elser Druck GmbH
Kißlingweg 35
75417 Mühlacker

Auslieferung und Vertrieb

e-mobil BW GmbH
Leuschnerstraße 45
70176 Stuttgart
Telefon +49 711 892385-0
Fax +49 711 892385-49
info@e-mobilbw.de
www.e-mobilbw.de

Juli 2019

© Copyright liegt bei den Herausgebern

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Für die Richtigkeit der Herstellerangaben wird keine Gewähr übernommen.



www.e-mobilbw.de

e-mobil BW GmbH

Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und
Automotive Baden-Württemberg

Leuschnerstraße 45 | 70176 Stuttgart

Telefon +49 711 892385-0 | Fax +49 711 892385-49

info@e-mobilbw.de

