



LithoRec



Ressourcenverfügbarkeit von sekundären Rohstoffen

-Potenzialanalyse für Lithium und Kobalt -

Umbrella-Arbeitsgruppe Ressourcenverfügbarkeit im Rahmen der BMU-geförderten Projekte LithoRec und LiBRI

Abschlussbericht, Oktober 2011

Bearbeiter:

Stella Konietzko (Volkswagen)

Marko Gernuks (Volkswagen)

Mitglieder der Arbeitsgruppe:

Rainer Aul (Chemetall)

Ernst-Robert Barensee (Evonik)

Matthias Buchert (Öko-Institut)

Anita Engler (Daimler)

Claas Hoyer (TU Braunschweig)

Wolfgang Jenseit (Öko-Institut)

Martin Steinbild (Chemetall)

Frank Treffer (Umicore)

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielsetzung	4
2. Vorgehensweise	5
2.1 Methodischer Ansatz	5
2.2 Modellstruktur	6
3. Szenarien für den Batterierohstoff Lithium	7
3.1 Szenarioannahmen	7
3.1.1 Aufkommen von Traktionsbatterien	7
3.1.1.1 Entwicklungen des Fahrzeugmarkts	7
3.1.1.2 Nutzungsdauer elektrifizierter Fahrzeuge	10
3.1.1.3 Nutzungsdauer von Traktionsbatterien	10
3.1.1.4 Exportquoten von elektrifizierten Fahrzeugen	12
3.1.1.5 Anteil und Verweildauer von Traktionsbatterien in weiteren Verwendungen	12
3.1.2 Lithiumgewinnung aus Traktionsbatterien	13
3.1.2.1 Sammelquoten von Traktionsbatterien	13
3.1.2.2 Lithiumgehalt in Traktionsbatterien	13
3.1.2.3 Wiedergewinnungsquoten von Lithium aus Traktionsbatterien	14
3.1.3 Nachfrage und Recycling in weiteren Branchen	14
3.1.3.1 Wachstumsraten der Märkte	14
3.1.3.2 Recycling in weiteren Branchen	15
3.1.3.3 Sammelquoten recycelbarer Produkte	16
3.1.3.4 Wiedergewinnungsquoten von Lithium aus recycelbareren Produkten	16
3.2 Szenarioergebnisse Lithiumverfügbarkeit	17
3.2.1 Ergebnisvergleich im globalen Bezugsraum	17
3.2.2 Ergebnisvergleich im europäischen Bezugsraum	19
3.2.3 Sensitivitäten ausgewählter Systemgrößen	20
3.2.3.1 Einfluss des Kathodenmaterials auf die Sekundärproduktion	20
3.2.3.2 Einfluss der Nutzungsdauer der Traktionsbatterie auf die Sekundärproduktion ..	21

4. Szenarien für den Batterierohstoff Kobalt	22
4.1 Allgemeine Szenarioannahmen	22
4.1.1 Kobaltgewinnung aus Traktionsbatterien.....	22
4.1.1.1 Kobaltgehalt in Traktionsbatterien.....	22
4.1.1.2 Wiedergewinnungsquoten von Kobalt aus Traktionsbatterien	22
4.1.2 Nachfrage und Recycling weiterer Branchen.....	22
4.1.2.1 Wachstumsraten der Märkte.....	22
4.1.2.2 Nutzungsdauern.....	23
4.1.2.3 Sammelquoten recycelbarer Produkte.....	23
4.1.2.4 Wiedergewinnungsquoten von Kobalt aus recycelbaren Produkten.....	23
4.2 Szenarioergebnisse Kobaltverfügbarkeit	24
4.2.1 Szenarioergebnisse für den globalen Bezugsraum.....	24
4.2.2 Szenarioergebnisse für den europäischen Bezugsraum.....	26
4.2.3 Sensitivitätsanalysen ausgewählter Systeme.....	26
4.2.3.1 Einfluss des Kathodenmaterials auf die Sekundärproduktion aus Alt- Traktionsbatterien.....	26
4.2.3.2 Einfluss der Sammelquote auf die Sekundärproduktion aus weiteren Branchen..	27
5. Fazit	28
6. Quellenverzeichnis	30

1. Einleitung und Zielsetzung

In den letzten Jahren waren die Rohstoffpreise von starken Schwankungen geprägt. Nach einer anhaltenden Rohstoffhausse brachen die Preise metallischer Rohstoffe im Zuge der weltweiten Finanz- und Wirtschaftskrise ein. Seit 2009 ist die Erholung an den Metallmärkten jedoch wieder deutlich zu spüren. Dies ist im Wesentlichen auf die steigende Nachfrage aus Schwellenländern wie Brasilien, Russland und Indien sowie insbesondere China zurückzuführen. Die steigende Nachfrage ging mit ebenso wieder steigenden Rohstoffkosten einher. Unternehmen der verarbeitenden Industrie stehen nun vor der Aufgabe, Preis- und daraus resultierende Planungsunsicherheiten mit geeigneten Strategien zu begegnen. Dies stellt besonders bei neuen Technologien wie der E-Mobilität eine Herausforderung dar, da hier die Prognosen für die Marktdurchdringung noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Allein in den Jahren von 2003 bis 2008 nahmen die Rohstoffkosten eines im E-Fahrzeug eingesetzten Elektromotors und einer Lithium-Ionen-Batterie um etwa das 3,5-fache zu. Abb.1-1 stellt die Preisvolatilität für diese Komponenten dar.

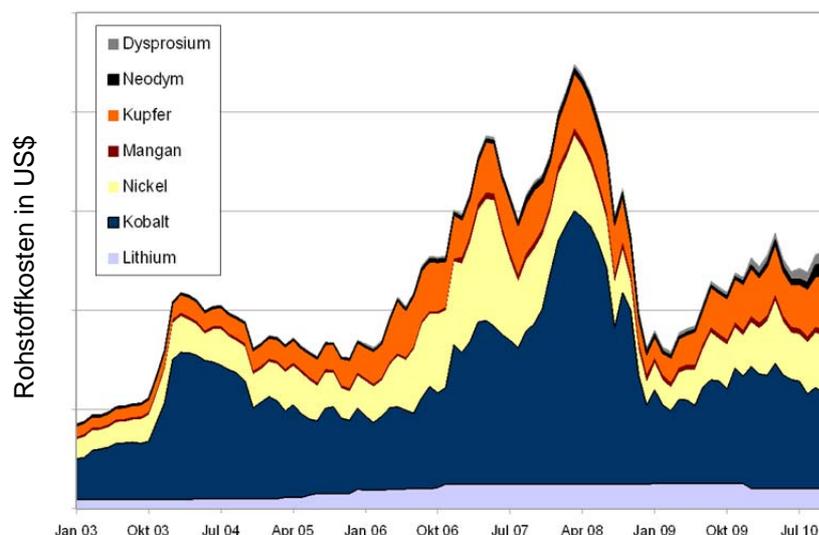


Abbildung 1-1 Preisschwankungen der Rohstoffkosten eines Elektromotors und einer 25 kWh-Li-Ionen-Batterie (Quelle: Metal Bulletin, BGR-Datenbank, Volkswagen-Daten)

Neben Rohstoffkosten spielen auch etwaige Versorgungsrisiken eine wichtige Rolle, sei es beim Risikomanagement eines Unternehmens oder auch bei der Versorgungssicherheit eines ganzen Staates. Derzeit bildet sich im Rohstoffsektor eine neue Unternehmenslandschaft heraus. Immer mehr Bergbauunternehmen aus China, Indien, der Gemeinschaft Unabhängiger Staaten und anderen Entwicklungsländern drängen auf den Markt. China entwickelte sich bereits 2006 zum größten Bergbauland, und alle BRIC-Staaten (Brasilien, Russland, Indien und China) befinden sich unter den elf größten Bergbauländern (Ericsson 2009). Europa ist reiner Importeur von Metallrohstoffen und befindet sich somit bei der Versorgung mit strategisch wichtigen Metallen wie beispielsweise Lithium und Kobalt in einer

Abhängigkeitssituation. Die Gewinnung von Sekundärrohstoffen durch Recycling kann an dieser Stelle eine Möglichkeit zur Reduzierung dieser Abhängigkeit bieten.

Der Einsatz von Li-Ionen-Batterien in Fahrzeugen stellt eine Schlüsseltechnologie im Bereich neuer Antriebskonzepte dar. Das Metall Lithium ist in dieser Technologie nicht ersetzbar. Auch Kobalt ist in einer Vielzahl der heute gängigen Kathodenmaterialien enthalten. Mit Einführung der Elektromobilität wird sich die Nachfrage nach diesen Batterierohstoffen voraussichtlich stark erhöhen. Eventuell resultierende Versorgungsengpässe bei Lithium und Kobalt müssen daher frühzeitig abgeschätzt werden, um rechtzeitig Maßnahmen einzuleiten und eine Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Ziel der Arbeit ist somit zum einen die Identifizierung der wesentlichen Einflussgrößen der Rohstoffverfügbarkeiten von Lithium und Kobalt und, darauf aufbauend, die Analyse letzterer mit Hilfe eines Modells. Dabei soll besonders das Potenzial von Sekundärrohstoffen herausgearbeitet werden.

Analysen werden sowohl für den globalen als auch für den europäischen Bezugsraum durchgeführt. Im Wesentlichen steht die Beantwortung der Frage im Vordergrund, zu welchem Anteil der zukünftige Bedarf eines Rohstoffs aus sekundären Quellen gedeckt werden kann und welche Kapazitäten für das Recycling von Traktionsbatterien aufgebaut werden müssen.

2. Vorgehensweise

2.1 Methodischer Ansatz

In der Arbeit wird ein System Dynamics-Ansatz zur Modellierung von Stoffströmen gewählt. Die Methode wurde von Jay W. Forrester an der Sloan School of Management am Massachusetts Institute of Technology entwickelt (Forrester 1971). Sie kann zur Untersuchung von dynamischen Problemen in komplexen sozialen, ökologischen, ökonomischen und Management-Systemen – also Systemen, die durch Abhängigkeiten und wechselseitige Beeinflussung gekennzeichnet sind – herangezogen werden (System Dynamics Society 2011).

Gegenüber einer vereinfachten Stoffstrommodellierung, die nicht den systemdynamischen Ansatz verfolgt, bietet die Methode wesentliche Vorteile (Deutsche Gesellschaft für System Dynamics e.V. 2011)

1. Es wird nicht nur der Ist-Zustand abgebildet. Modellierungsergebnisse können prinzipiell für Zeitpunkte in der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft gewonnen werden. Dadurch können Verzögerungseffekte, die besonders häufig bei der Einführung zukünftiger Technologien auftreten, gut herausgearbeitet werden.
2. Die Einflussgrößen des Systems werden nicht separiert voneinander betrachtet. Komplexe Kausalstrukturen können analysiert und abgebildet werden. Somit können

beispielsweise auch verstärkende Rückkopplungseffekte mit in die Analyse einbezogen werden.

3. Die Auswirkung von einzelnen Entscheidungen ist in komplexen Systemen kaum abzuschätzen und oftmals nicht intuitiv erkennbar. Der systemdynamische Ansatz bietet dagegen ein Instrument, mit dem die Tragweite unterschiedlicher Entscheidungsvarianten erfasst werden kann.

Der Prozess der Modellbildung ist iterativ. In einem ersten Schritt wird das System hinsichtlich einer konkreten Problemstellung aufgestellt. Hierbei geht es hauptsächlich um die Identifikation und Untersuchung in sich geschlossener Wirkungsketten. Erst im nächsten Schritt wird das qualitative Kausalmodell durch die mathematische Beschreibung der Systemparameter in ein quantitatives Modell konvertiert und dieses anschließend simuliert. Die Quantifizierung der Wechselwirkungsbeziehung zwischen den Einflussgrößen im System stellt dabei eine besondere Herausforderung dar, da diese unter Umständen mathematisch schwer zu erfassen ist. Unterschiedliche Modelldesigns und Hypothesen können getestet, die Simulationsergebnisse diskutiert sowie Verbesserungen und Verfeinerungen der Modellstruktur- und Annahmen in das Modell implementiert werden (Forrester 1994).

2.2 Modellstruktur

Das Modell für das Fallbeispiel Lithium ist in einzelne Submodelle untergliedert (Abb. 2-1). Die Nachfrage nach Lithium wird zum einen durch die Nachfrage nach elektrifizierten Antrieben, zum anderen durch die Nachfrage weiterer Branchen, die auf Lithium zugreifen, bestimmt. Studien und Expertenabschätzungen bilden die Grundlage für die Annahmen zur Marktentwicklung dieser Branchen und werden als exogene Parameter in das Modell eingelesen. Die Produktion von Primärlithium wird durch die errechnete Nachfrage gesteuert und von den geologischen Reserven sowie vom maximal möglichen Aufbau der Produktionskapazitäten begrenzt.

Das Aufkommen von Alt-Traktionsbatterien hängt entscheidend von der Entwicklung des Fahrzeugmarktes und von der Nutzungsdauer der Batterien ab. Unterschreitet die Nutzungsdauer der Batterien diejenige der Fahrzeuge, werden die dadurch benötigten Ersatzbatterien mit berücksichtigt. Unter Einbeziehung der Lithiuminhalte in der Batterie sowie der Sammel- und Wiedergewinnungsquoten können die benötigten Recyclingkapazitäten sowie die Produktion von sekundärem Lithium berechnet werden. Für das Fallbeispiel Kobalt wird die gleiche Modellstruktur herangezogen, wobei alle rohstoffspezifischen Parameter angepasst werden.

Das Modell wurde in die Software Vensim implementiert. Für die Simulationen wurde der Zeitraum von 2008 bis 2050 gewählt.

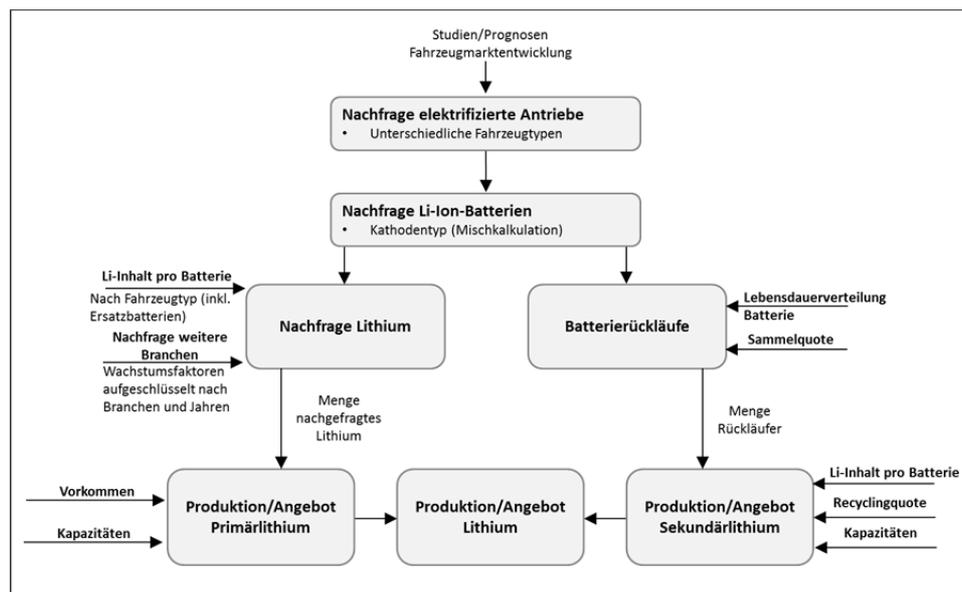


Abbildung 2-1 Struktur des Modells zur Abschätzung des Potenzials von Sekundärlithium

3. Szenarien für den Batterierohstoff Lithium

Im folgenden Kapitel wird das entwickelte Modell auf das Fallbeispiel Lithium angewendet. Der erste Teil „Szenarioannahmen“ ist entsprechend der einzelnen Modellsektoren gegliedert. Die „Szenarioergebnisse der Lithiumverfügbarkeit“ werden im zweiten Teil des Kapitels präsentiert, wobei die Ergebnisse immer als Lithiummetallgehalt dargestellt werden. Diese unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der unterschiedlichen Entwicklungen des Fahrzeugmarkts. Der Einfluss anderer essentieller Parameter auf die Sekundärproduktion wird anhand von Sensitivitätsanalysen erläutert. Es erfolgt eine Darstellung für den globalen sowie für den europäischen Bezugsraum.

3.1 Szenarioannahmen

3.1.1 Aufkommen von Traktionsbatterien

3.1.1.1 Entwicklungen des Fahrzeugmarkts

Der globale Fahrzeugmarkt

Die Entwicklung des Fahrzeugmarkts ist eine essentielle Größe bei der Abschätzung der zukünftig möglichen Produktion von sekundärem Lithium. Zahlreiche Studien widmen sich dieser Thematik, sei es für den globalen (McKinsey 2011) und den nationalen Bezugsraum (Deloitte 2010; Valentine-Urbschat, Bernhart 2009) oder auch für einzelne regionale Märkte (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg 2010). Als Grundlage dieser Arbeit wurden zwei vom Fraunhofer ISI erstellte Marktpenetrationsszenarien für Elektro- und Hybridfahrzeuge ausgewählt (Angerer et al. 2010). Zwei wesentliche Faktoren haben zur Auswahl dieser Studie beigetragen: Zum einen liegen Daten zur Marktzusammensetzung für

jedes Jahr von 2008 bis 2050 vor, so dass diese problemlos als exogene Zeitreihe in das Modell eingelesen werden können. Zum anderen dient die Fraunhofer-Studie als Referenz, mit welcher die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse bezüglich des Rezyklateinsatzes von Lithium validiert werden können. Die beiden ausgewählten Szenarien beruhen ihrerseits auf Arbeiten von Wietschel und Dallinger (2008) und unterteilen sich in ein moderates und ein optimistisches hinsichtlich der zukünftigen Elektrifizierung des Fuhrparks.

Unterschieden werden drei Fahrzeugtypen:

1. Stadt-BEV¹: bezeichnen Stadt-Elektrofahrzeuge, die die ganze Bandbreite des Kurzstreckentransports von Elektrorollern bis hin zu Kleintransportern umfassen und besitzen eine durchschnittliche Batteriekapazität von **20 kWh**. Da sie durch ihre geringe Anzahl nur eine untergeordnete Rolle spielen, werden sie aus Darstellungszwecken zu der EV/PHEV-Fraktion addiert.
2. HEV²: Hybridfahrzeuge mit **1,4 kWh** Batteriekapazität.
3. PHEV/EV³: Plug-In-Hybride und reine E-Fahrzeuge mit einer gemittelten Batteriekapazität von **20 kWh**.

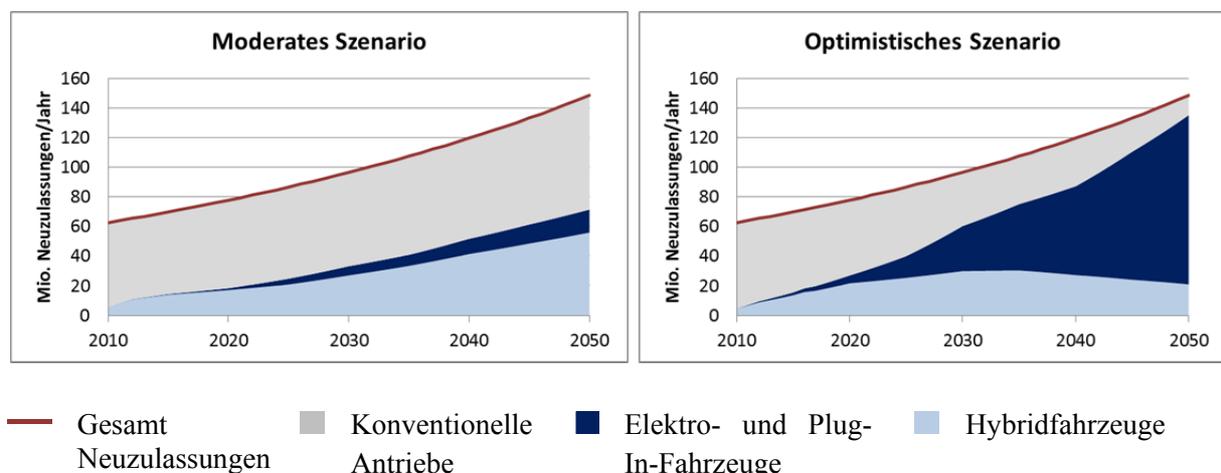


Abbildung 3-1 Globale Fahrzeugmarktentwicklung (Quelle: Angerer et al. 2010, WBCSD 2008)

Die Anzahl der Neuzulassungen pro Jahr wird in dieser Arbeit auf 60 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2008 gesetzt. Ab diesem Zeitpunkt wird angenommen, dass der Gesamtfahrzeugmarkt, wie vom WBCSD prognostiziert, um 2,18 % wächst (Fulton, Eads 2004).

Bei dem moderaten Szenario besitzen zum Zeitpunkt 2050 ca. 50 % aller Fahrzeuge einen elektrifizierten Antrieb, wobei Hybridfahrzeuge gegenüber den Elektro- und Plug-In-

¹ BEV: Battery Electric Vehicle

² HEV: Hybrid Electric Vehicle

³ PHEV: Plug-In Hybrid Electric Vehicle

Fahrzeugen dominieren. Im optimistischen Szenario setzen sich zunächst Hybridfahrzeuge durch, werden aber ab 2030 zunehmend durch Elektro- und Plug-In-Fahrzeuge verdrängt. 2050 ist der Gesamtfahrzeugmarkt in diesem Szenario zu ca. 90 % elektrifiziert.

Der europäische Fahrzeugmarkt

Die oben dargestellten Szenarien des Fraunhofer ISI wurden ursprünglich für den globalen Bezugsraum erstellt. Da in der Studie jedoch die Marktdurchdringung elektrifizierter Antriebe für die wichtigsten Märkte Europa, China, Nordamerika und Japan als gleich angenommen wird, wurde in einem ersten Schritt die Marktentwicklung in Europa mit der globalen gleichgesetzt.

Die Registrierungen von Neufahrzeugen (Personenfahrzeuge sowie leichte Nutzfahrzeuge und Busse bis 3,5 Tonnen) in Europa (EU27) werden vom Europäischen Automobilverband für das Jahr 2008 mit ca. 16,3 Mio. angegeben (ACEA Press Releases 2011). Das jährliche Wachstum des Gesamtfahrzeugmarkts liegt laut der Internationalen Energie Agentur bei 0 %, da von einer Sättigung des Fahrzeugmarktes in Europa ausgegangen wird (Fulton, Eads 2004). Unter der Annahme der gleichen relativen Marktpenetration wie im globalen Bezugsraum ergibt sich eine Marktzusammensetzung für Europa wie in Abb.3-2 dargestellt.

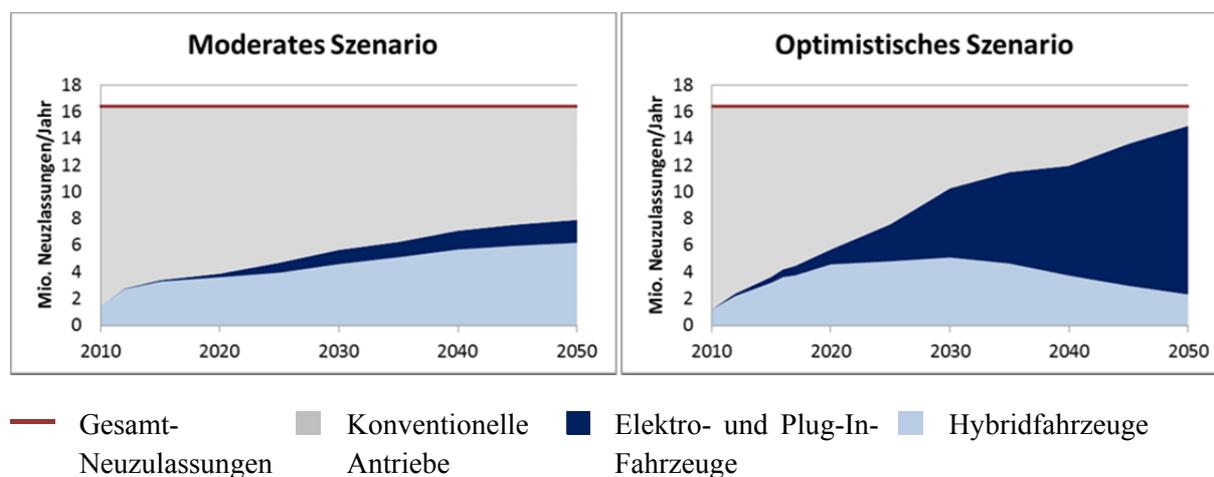


Abbildung 3-2 Fahrzeugmarktentwicklung in Europa (EU27) (Quelle: Angerer et al. 2010, ACEA,IEA)

3.1.1.2 Nutzungsdauer elektrifizierter Fahrzeuge

Die Nutzungsdauer eines Fahrzeuges wird durch viele einzelne Faktoren wie beispielsweise Qualität, Fahrzeuggröße, Unfallhäufigkeit usw. beeinflusst. Die statistische Beschreibung der durchschnittlichen Nutzungsdauer einer für den Markt repräsentativen Stichprobe leiten van Schaik et al. (2002) aus den Daten in den Niederlanden ab. Studien zu Nutzungsdauern von Hybrid- und E-Fahrzeugen liegen aufgrund ihres Neuheitsgrades nicht vor. Aus diesem Grund hat sich die Arbeitsgruppe darauf verständigt, eine Gauß-Verteilung heranzuziehen. Mit einem σ -Wert von drei Jahren spiegelt sie eine breitere Streuung der Nutzungsdauer wider. Die mittlere Nutzungsdauer wurde aufgrund des Technikfortschritts auf 15 Jahre gesetzt, von einer Unterscheidung zwischen Hybrid- bzw. E- und Plug-In-Fahrzeugen wurde abgesehen (siehe Abb.3-3).

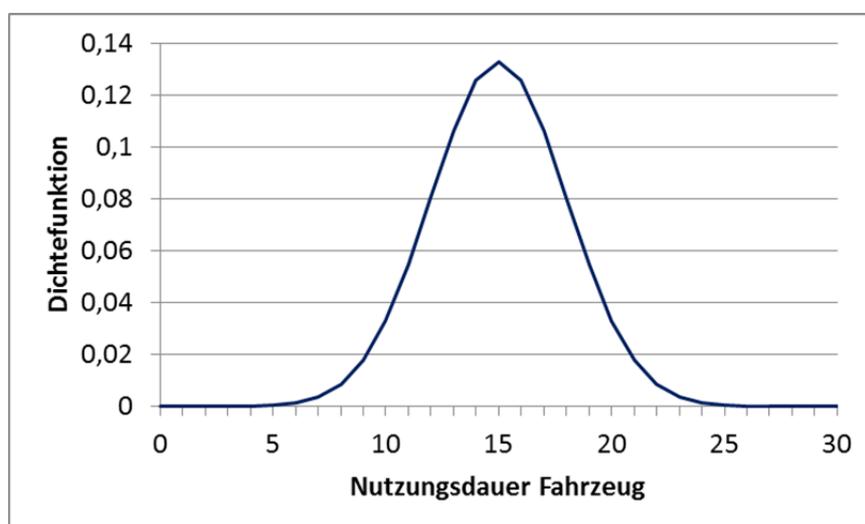


Abbildung 3-3 Nutzungsdauerverteilung von Fahrzeugen

3.1.1.3 Nutzungsdauer von Traktionsbatterien

Dem Kunden steht schon heute beim Kauf eine Reihe von Hybridfahrzeugen zur Verfügung, diese setzen jedoch bislang überwiegend auf eine andere als die Li-Ionen-Batterietechnologie⁴. Somit existieren zum heutigen Zeitpunkt noch keine Langzeitstudien über das Alterungsverhalten dieser Batterien im Fahrzeug. Im Fall von Traktionsbatterien bezieht sich der Begriff Nutzungsdauer auf die Verweilzeit im Fahrzeug. Eine Traktionsbatterie ist, nach Anforderung der Automobilindustrie, so lange für eine Anwendung im Fahrzeug geeignet, bis ihre Kapazität 80 % ihrer Nennkapazität unterschreitet. Diese wird von einer ganzen Reihe von Faktoren beeinflusst, wie beispielsweise der Betriebstemperatur, der Temperatur beim Laden, der maximalen Umgebungstemperatur, von Temperaturschwankungen und Belastungen durch Lade- und Entladeströme (C-Rate), der

⁴ NiMH-Batterien (Nickel-Metall-Hydrid), z.B. im Volkswagen Touareg Hybrid oder Toyota Prius

Zyklenzahl, dem Ladehub⁵ und vielen weiteren. Viele dieser Parameter beeinflussen sich zudem gegenseitig und wirken je nach eingesetzten Aktivmaterialien und Elektrolytzusammensetzung unterschiedlich (Evonik 2011 b.). Abb.3-4 zeigt Versuchsergebnisse⁶ zum Verlauf der Kapazität in Abhängigkeit der Anzahl der Ladezyklen. Bis zu einer Batteriekapazität von 80 % verläuft die Abnahme noch mit geringer negativer Steigung, danach fällt sie, bei gleich bleibenden Versuchsbedingungen, stärker ab. Die 80 %-Marke für den Batterieeinsatz in Fahrzeugen ist ein bislang in der Praxis gebräuchlicher Schwellenwert, der den momentanen Anforderungen der Automobilindustrie gerecht wird. Dieser muss sich in Zukunft erst noch bestätigen.

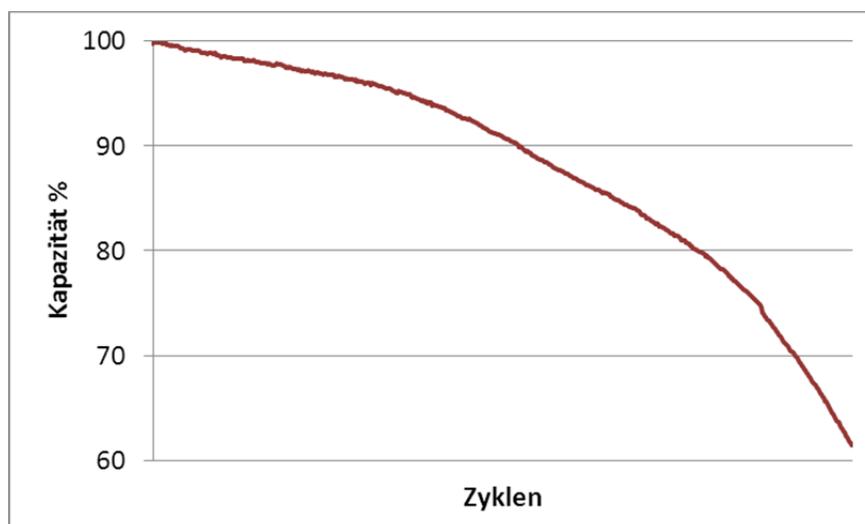


Abbildung 3-4 Degradation der Batteriekapazität in Abhängigkeit der Zyklenanzahl (Quelle: Evonik)

Aufgrund der beschriebenen Komplexität wird die Nutzungsdauerverteilung in einem ersten Schritt, wie diejenige der Hybrid-, Plug-In- und E-Fahrzeuge, einer Normalverteilung gleichgesetzt. Es wird angestrebt, dass die mittlere Nutzungsdauer einer Batterie diejenige eines Fahrzeugs nicht unterschreitet. Nach Einschätzung der Arbeitsgruppe kann diese Anforderung nicht unmittelbar verwirklicht werden. Um die Situation im Modell abzubilden, wird die mittlere Nutzungsdauer der Traktionsbatterien stufenweise von 10 auf 15 Jahre erhöht (Abb.3-5).

⁵ Gibt die Differenz zwischen dem Ausgangsladezustand und Zielladezustand beim Be- oder Entladen an

⁶ 3C/3C-Zyklen

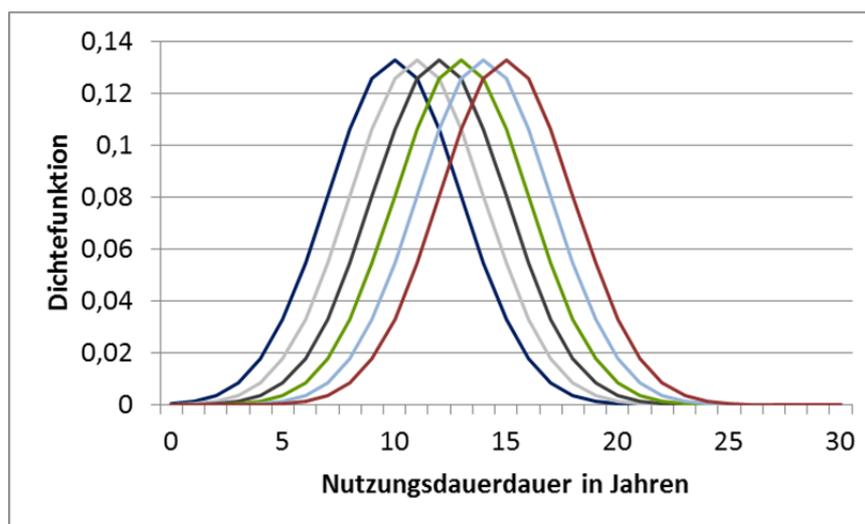


Abbildung 3-5 Angenommene Nutzungsdauerverteilung von Traktionsbatterien mit stufenweiser Erhöhung der mittleren Nutzungsdauer

3.1.1.4 Exportquoten von elektrifizierten Fahrzeugen

Exportquoten sind im Modell nur für die Betrachtung des europäischen Bezugsraums erforderlich. Karpel (2002) kommt in seiner Arbeit zu der Abschätzung, dass ca. 30 % aller in Europa neu zugelassenen Fahrzeuge nicht im innereuropäischen Markt einem Recycling zugeführt werden. Dieser Prozentsatz ist nach Ansicht der Arbeitsgruppe für Fahrzeuge mit nicht konventionellen Antrieben zu hoch. Ein Großteil der Altfahrzeuge wird in Entwicklungsländer wie beispielsweise Afrika exportiert, wo die notwendige Infrastruktur⁷ für den Einsatz von Hybrid- und E-Fahrzeugen auch zukünftig zunächst nicht gegeben sein wird. Die Gruppe verständigte sich daher auf eine Exportquote von 5 % (siehe auch Melhart et al., 2011).

3.1.1.5 Anteil und Verweildauer von Traktionsbatterien in weiteren Verwendungen

Nach dem Einsatz im Fahrzeug besteht die Möglichkeit, die Batterie in eine weitere Anwendung zu überführen. Denkbar ist z.B. der Einsatz bei Energieerzeugern⁸ oder aber auch als Energiespeicher für unterschiedliche Zwecke⁹. Beachtet werden muss dabei jedoch die rasche Abnahme der Kapazität mit steigender Zyklenzahl, sobald der Schwellenwert von 80 % unterschritten wird (Abb.3-4). Je nach Beanspruchung der Batterie in der jeweiligen

⁷ Z.B. Stromnetze, Ladevorrichtungen, Werkstätten

⁸ Beispielsweise Blockheizkraftwerke, Strompuffer für Solar-Anlagen, Windkraft-Anlagen, Kraftwerke

⁹ Beispielsweise Grid-Services, Regelenergiemarkt, Schnellladestationen für HEV/EV

Anwendung variiert entsprechend auch die Verweildauer. Als aggregierten Wert für die Verweildauer wählte die Gruppe auf Empfehlung von Evonik einen Wert von 3 Jahren (Evonik 2011 a). Die möglichen Weiterverwendungen befinden sich momentan noch in einem Konzeptstadium. Die Arbeitsgruppe nimmt daher vorerst an, dass durchschnittlich 15 % aller Traktionsbatterien aus einem Altfahrzeug anschließend noch in einer weiteren Verwendung zum Einsatz kommen.

3.1.2 Lithiumgewinnung aus Traktionsbatterien

3.1.2.1 Sammelquoten von Traktionsbatterien

Die Sammelquote wird in dieser Arbeit als der Anteil an Alt-Batterien definiert, der durch geeignete Sammel- und Transportsysteme dem Recycling zugeführt wird.

Global

Das hohe Volumen und Gewicht der Batterien sowie die Hochvolt-Umgebung des Speichersystems erfordern in der Regel eine fachmännische Entfernung aus dem Fahrzeug. Ihr hoher monetärer Wert ist ein weiterer Faktor, der eine relativ hohe Sammelquote erwarten lässt. Dennoch geht die Arbeitsgruppe davon aus, dass weltweit die Sammelkonzepte nicht so ausgereift sein werden, wie diejenigen in Europa. Aus diesem Grund wird die globale Sammelquote mit 80 % angesetzt.

Europa

Durch geeignete Sammelkonzepte können wahrscheinlich sehr hohe Sammelquoten ähnlich jenen von Starterbatterien in Fahrzeugen erreicht werden. Schmidt (2005) gibt die Sammelquote von Starterbatterien in Deutschland mit 95 % an. Dieser Wert wird für die Sammelquote von Traktionsbatterien in Europa übernommen.

3.1.2.2 Lithiumgehalt in Traktionsbatterien

Die Werte für den Lithiumgehalt der Traktionsbatterien stammen von der Firma Evonik. Sie werden in g/kWh angegeben. Exemplarisch werden in dieser Arbeit zwei Kathodentypen ausgewählt: NMC-Kathoden¹⁰ und LFP-Kathoden¹¹.

- NMC-Kathode: 157 g/kWh
- LFP-Kathode: 101 g/kWh

¹⁰ Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Kathoden

¹¹ Lithium-Eisen-Phosphat-Kathoden

Außerdem wird aufgrund ihrer technisch leicht voneinander abweichenden Eigenschaften eine Unterscheidung bei der Marktdurchdringung in den unterschiedlichen Fahrzeugtypen vorgenommen:

- HEV: Verhältnis NMC:LFP entspricht 20:80
- EV/PHEV: Verhältnis NMC:LFP entspricht 65:35

3.1.2.3 Wiedergewinnungsquoten von Lithium aus Traktionsbatterien

Als Wiedergewinnungsquote wird das Verhältnis des in den gesammelten Batterien enthaltenen Lithiums zu der im Recycling gewonnenen Menge an Lithium aus diesen Batterien festgelegt. Die Wiedergewinnung erfordert mehrere mechanische Trennschritte sowie anschließende chemische/metallurgische Aufbereitungsprozesse. Daher werden in jedem Schritt Ausbeuteverluste zu verzeichnen sein. Es wird geschätzt, dass sich eine Wiedergewinnungsquote von 60 % ergibt, wobei die Entwicklungen der einzelnen Prozessschritte noch nicht abgeschlossen sind.

3.1.3 Nachfrage und Recycling in weiteren Branchen

3.1.3.1 Wachstumsraten der Märkte

Neben den Traktionsbatterien wird Lithium in einer Vielzahl von weiteren Anwendungen eingesetzt. Zur Abschätzung des zukünftigen Rezyklatanteils ist es unerlässlich, die Marktentwicklung dieser Branchen einzuschätzen. Abb. 3-6 und 3-7 stellen die angenommene Nachfrageentwicklung für den globalen bzw. den europäischen Bezugsraum dar. Die verwendeten Daten beruhen auf Angaben von Roskill (2009), Angerer et al. (2010) und TRU Group Inc. (2011) sowie auf eigenen Abschätzungen. Die Datenlage zum Verbrauch in Europa ist in der Literatur lückenhaft, die Einschätzung der zukünftigen Entwicklung der Branchen ist somit mit etwas größeren Unsicherheiten behaftet. Wichtig zu erwähnen an dieser Stelle ist, dass sich die Zahlen nicht auf den zur Produktion von Gütern benötigten Bedarf beziehen, sondern auf den Bedarf nach Lithium in Gütern, die innerhalb Europas konsumiert werden.

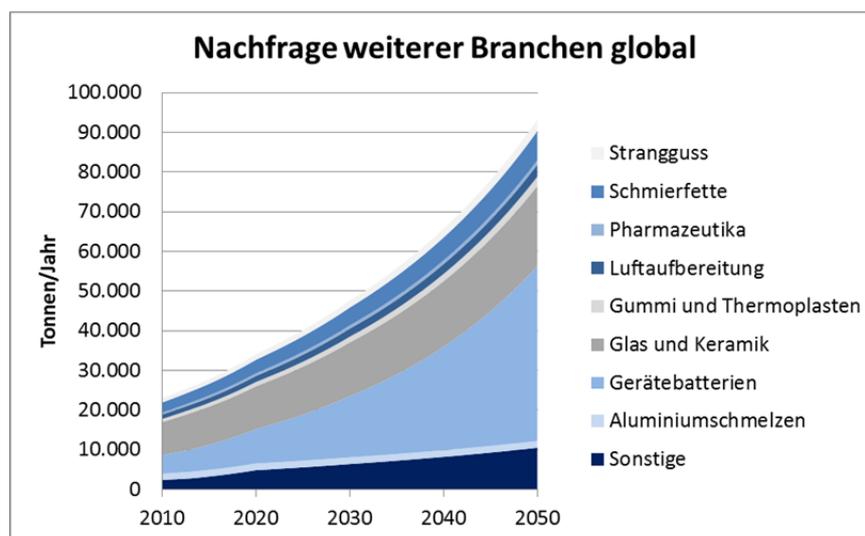


Abbildung 3-6 Globale Nachfrageentwicklung der lithiumverwendenden Branchen ohne Traktionsbatterien

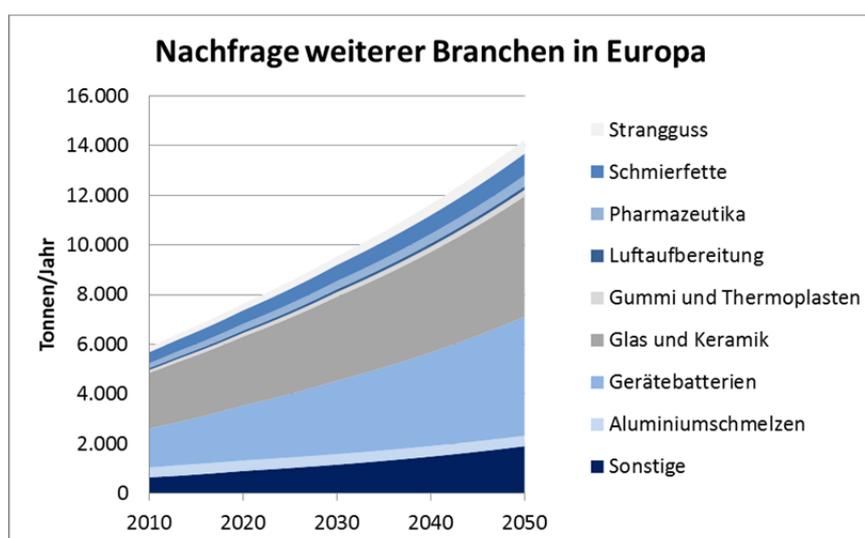


Abbildung 3-7 Nachfrageentwicklung der lithiumverwendenden Branchen in Europa ohne Traktionsbatterien

3.1.3.2 Recycling in weiteren Branchen

Zusätzlich zu den Traktionsbatterien werden zwei Marktsektoren in der Modellierung berücksichtigt, die einen Beitrag zur Sekundärproduktion von Lithium leisten:

1. Luftaufbereitung
2. Primäre und sekundäre Gerätebatterien

Die durchschnittliche Nutzungsdauer von Gerätebatterien liegt schätzungsweise bei 2 bis 3 Jahren. Da in vielen Haushalten Gerätebatterien zunächst „gehörtet“ werden, bevor sie durch den Endverbraucher in das Sammelsystem gelangen, wird ein Wert von 5 Jahren veranschlagt

Wendl (2009). Das in der Luftaufbereitung eingesetzte Lithium-Bromid wird in 5-Jahres-Zyklen ausgetauscht (Roskill 2009).

In den übrigen Branchen wird auch in Zukunft kein Recycling erwartet, das ökonomisch und/oder ökologisch tragfähig ist.

3.1.3.3 Sammelquoten recycelbarer Produkte

Das in der Luftaufbereitung verwendete Lithium kommt überwiegend in großtechnischen Anlagen zum Einsatz. Eine Sammelquote von 95 % scheint hier, sowohl global als auch in Europa, realistisch. Die globale Sammelquote von Geräte-Alt-Batterien wird in der Arbeitsgruppe mit 20 % angesetzt.

In Europa können die Sammelquoten für Geräte-Alt-Batterien deutlich höher angesetzt werden. Abb.3-8 zeigt die erreichten Sammelquoten von ausgewählten Ländern innerhalb Europas im Jahr 2005. Viele der Länder liegen noch deutlich unter 40 %. Die GRS Batterien (2011) dokumentiert für 2010 schon eine deutsche Sammelquote von 44 %. Die Arbeitsgruppe geht davon aus, dass europaweit die Effizienz der Sammelsysteme gesteigert wird. Bis 2050 wurde daher eine durchschnittliche Sammelquote von 40 % veranschlagt.

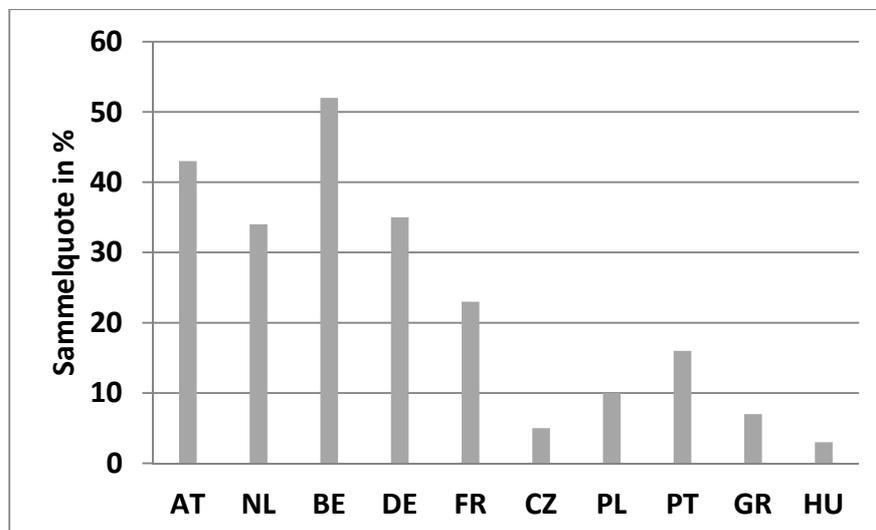


Abbildung 3-8 Sammelquoten in europäischen Ländern 2005 (Quelle: Schmidt 2007)

3.1.3.4 Wiedergewinnungsquoten von Lithium aus recycelbareren Produkten

Wie auch bei den Traktionsbatterien wird bei Geräte-Batterien zukünftig für Lithium eine Wiedergewinnungsquote von 60 % angenommen. Durch die nahezu vollständige Wiederverwendung des Lithium-Bromids bei der Luftaufbereitung kann hier die Wiedergewinnungsquote mit 100 % angenommen werden.

3.2 Szenarioergebnisse Lithiumverfügbarkeit

3.2.1 Ergebnisvergleich im globalen Bezugsraum

Unter den zuvor beschriebenen Annahmen liegt der Jahresverbrauch an Lithium im Jahr 2050 zwischen 150.000 und knapp 450.000 Tonnen (Abb.3-9). Je nach zugrundeliegendem Szenario beträgt der potenzielle Rezyklateinsatz, also das Verhältnis aus Nachfrage und Sekundärproduktion, dabei 17 % (moderates Szenario) bis 19 % (optimistisches Szenario).

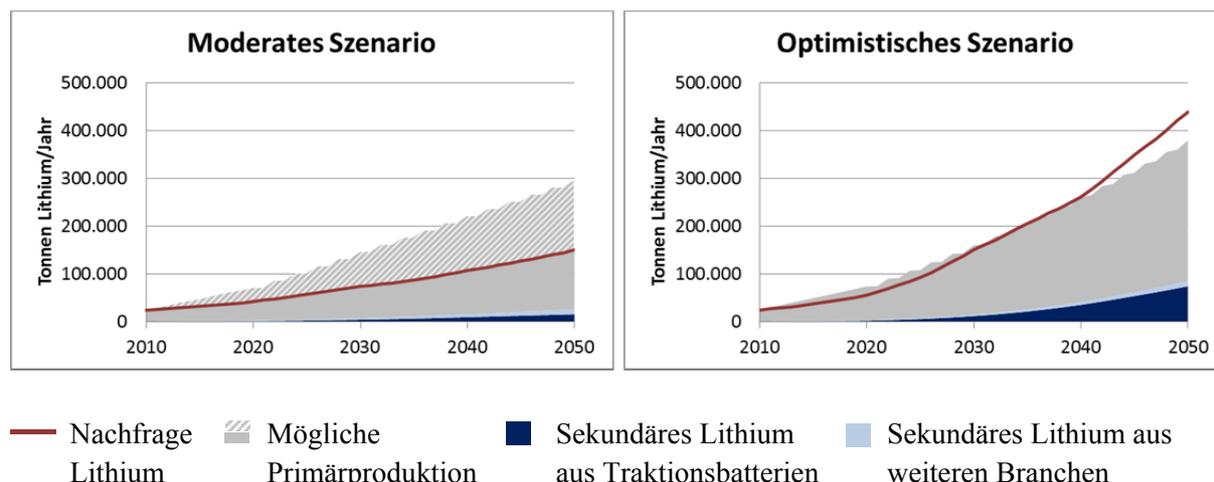


Abbildung 3-9 Globale Entwicklung von Nachfrage, Sekundärproduktion und möglichen Primärkapazitäten von Lithium

Die geringe Abweichung von 2 Prozentpunkten beim Rezyklateinsatz zeigt, dass Nachfrage und Sekundärproduktion ungefähr proportional zueinander wachsen. Dies resultiert daraus, dass der Bedarf und das Recycling aus weiteren Branchen, auch im moderaten Szenario, in Relation zum Traktionsbatteriemarkt nur eine untergeordnete Rolle spielen. Traktionsbatterien bestimmen 2050 sowohl die Nachfrage, als auch den Sekundärmarkt. Die verbleibenden 2 Prozentpunkte Delta sind auf die unterschiedliche Marktdurchdringung der elektrifizierten Antriebe in den beiden Szenarien zurückzuführen, wobei im Wesentlichen zwei Faktoren zum Tragen kommen: Zum einen wird im moderaten Szenario von einer Marktdurchdringung der elektrifizierten Antriebe von ca. 50 % ausgegangen, wohingegen im optimistischen Szenario ca. 90 % der Antriebe elektrifiziert sind. Zum anderen unterscheidet sich die Marktzusammensetzung im optimistischen Szenario dahingehend, dass proportional mehr Elektro- als Hybridfahrzeuge auf dem Markt sind. Der Anteil an lithiumnachfragenden Branchen, aus denen keine Sekundärströme erwartet werden, ist somit noch geringer, als im moderaten Szenario.

Abb.3-9 enthält außerdem eine mögliche Entwicklung der Primärproduktion (in Abhängigkeit der Bedarfsentwicklung), die auf Angaben der Firma Chemetall beruht. Durch Kapazitätserweiterungen der existierenden Lithium-Produzenten, sowie durch Neuprojekte, können die Kapazitäten bis 2020 mehr oder weniger linear auf 70.000 Jahrestonnen Lithium zunehmen. Hierdurch kann der Bedarf beider Szenarien ausreichend gedeckt werden. Bis 2020 wird die Marktentwicklung zeigen, ob im moderaten Szenario einfach ein weiterer

Kapazitätsausbau in etwa gleicher Geschwindigkeit beibehalten werden kann, oder im optimistischen Szenario der Kapazitätsausbau deutlich intensiviert werden muss. Um dem optimistischen Szenario zu folgen, müssten die Kapazitäten in Zweijahresrhythmen um jeweils ca. 15.000 Tonnen Li ausgebaut werden.

In Anbetracht der großen Anzahl an Lithium-Erweiterungs- und Explorationsprojekten (aktuell mehr als 70 weltweit) wird o. g. notwendiger Kapazitätsausbau als realistisch möglich erachtet. Unterstützt wird dies durch die kontinuierlich wachsenden Mengen an neuen Lithium-Ressourcen., die mittel- und langfristig mit weiterentwickelten Lithium-Gewinnungsmethoden ausgebeutet werden können. Angemerkt sei hier, dass es sich dabei um eine vorläufige Einschätzung einer möglichen Primärproduktionsentwicklung handelt, die sowohl nach oben als auch nach unten korrigiert werden kann

Der kumulierte Lithium-Verbrauch wird in Abb.3-10 aufgezeigt. In keinem der Szenarien erreicht der Verbrauch die heutigen Reserven¹² von 13 Mio. Tonnen (USGS 2011). Bei dem Reservenbegriff handelt es sich um eine dynamische Größe, die durch weitere Exploration, steigende Rohstoffpreise oder technischen Fortschritt beim Abbau steigen kann. Die weltweiten Ressourcen¹³ werden vom USGS auf ca. 33 Mio. Tonnen geschätzt.

Nicht unerwähnt bleiben sollte die Tatsache, dass im optimistischen Szenario bis 2050 sich gut 1/3 der heute bekannten Lithium Reserven in (potenziell recycelbaren) Traktionsbatterien befinden können, was die Notwendigkeit eines umfassenden Recyclingsystems unterstreichen könnte.

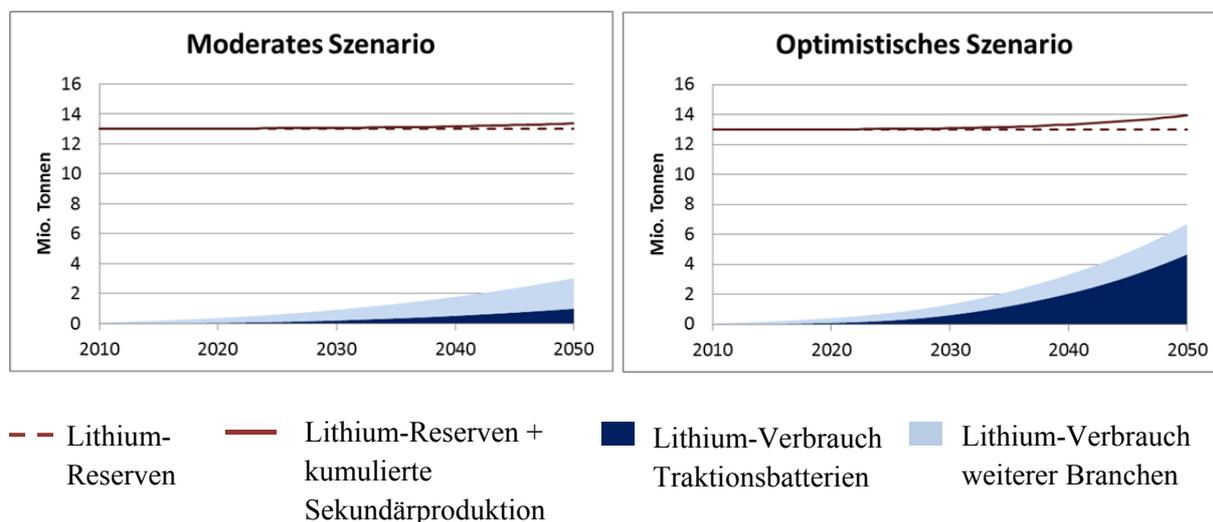


Abbildung 3-10 Bedeutung des kumulierten Lithium-Verbrauchs für die geologischen Reserven

¹²Als Reserve wird der Anteil der derzeit bekannten Vorkommen bezeichnet, der schon heute wirtschaftlich abgebaut werden kann USGS (2011).

¹³ Eine mineralische Ressource ist laut USGS (2011) ein natürlich vorkommender Festkörper in der Erdkruste, dessen Form und Konzentration heute oder in der Zukunft einen wirtschaftlichen Abbau ermöglichen.

Zur Planung der benötigten Kapazitäten ist für ein Recyclingunternehmen neben dem zu erwartenden Rohstoffgewinn ebenso die Abschätzung des Aufkommens von Altbatterien notwendig. Abb.3-11 zeigt die auf Grundlage der Szenarien zu erwartende Menge an Traktionsbatterien in Sammelstellen, unterschieden zwischen Hybridbatterien und Batterien für E- und Plug-In-Fahrzeuge.

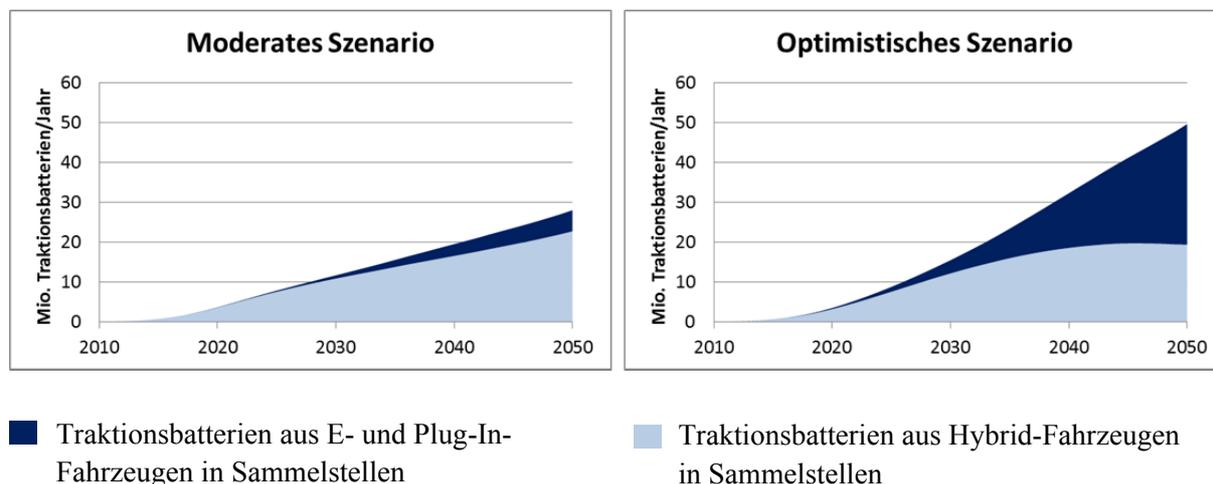


Abbildung 3-11 Globales Aufkommen von Traktionsbatterien in Sammelstellen

3.2.2 Ergebnisvergleich im europäischen Bezugsraum

In Europa kann 2050 mit einer Nachfrage von 20.000 bis ca. 50.000 Tonnen Lithium pro Jahr gerechnet werden (Abb.3-12). Der Bedarf orientiert sich dabei an der Entwicklung des Fahrzeugmarkts (vgl. Abb.3-2). Der Rezyklatanteil beträgt im Jahr 2050 zwischen 17 % und 23 %, das Delta ist mit 6 Prozentpunkten also größer als bei der globalen Auswertung. Zwar findet, gemäß der getroffenen Annahmen, auch im europäischen Markt in gleicher Weise eine Elektrifizierung der Antriebe statt, jedoch steigt die Gesamtzahl der Fahrzeuge nicht an. Somit ist der durch die Traktionsbatterien verursachte relative Mehrbedarf an Lithium niedriger als im globalen Vergleich. Besonders im moderaten Szenario nehmen Branchen, aus denen keine Recyclingströme zu erwarten sind, noch einen relativ großen Anteil an der Nachfrage nach Lithium ein. Dies ändert sich dann bei zunehmender Marktdurchdringung der Elektrofahrzeuge. Abb.3-13 stellt darüber hinaus das Aufkommen von Traktionsbatterien in Europa dar, mit welchem entsprechend der Szenarien gerechnet werden kann.

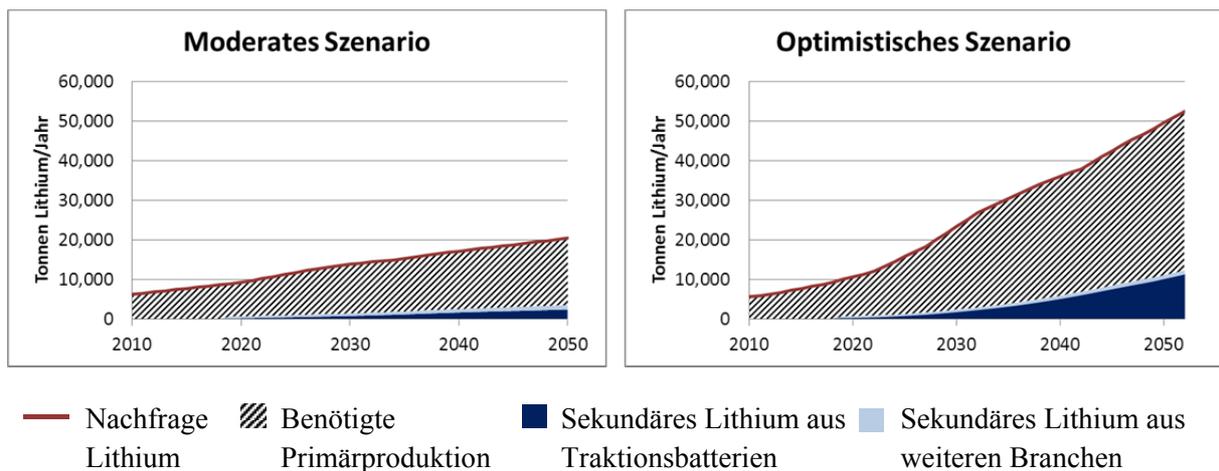


Abbildung 3-12 Entwicklung von Nachfrage, Sekundärproduktion und benötigter Primärproduktion von Lithium in Europa

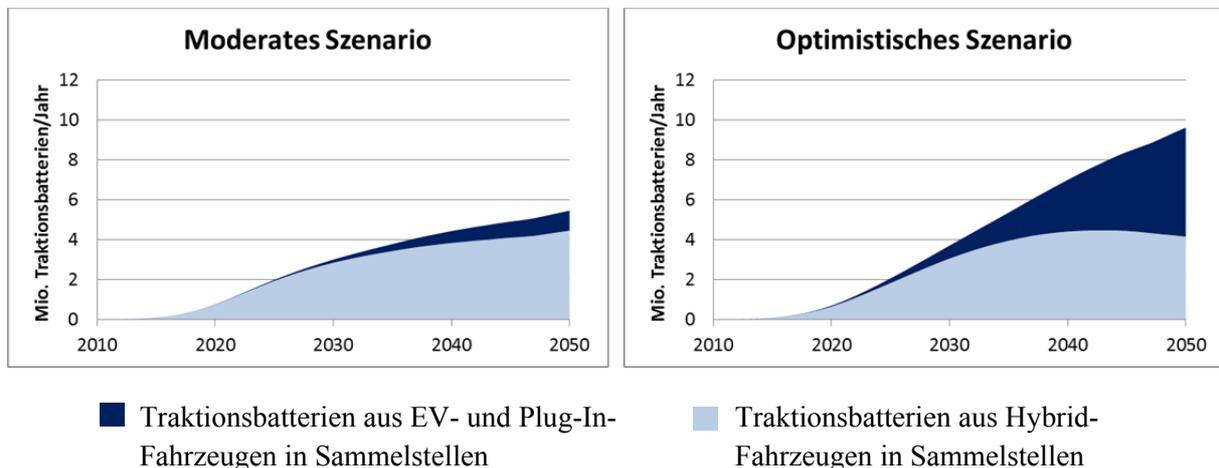


Abbildung 3-13 Aufkommen von Traktionsbatterien in Sammelstellen in Europa

3.2.3 Sensitivitäten ausgewählter Systemgrößen

Bei einer Sensitivitätsanalyse werden die Werte einer oder mehrerer Konstanten in dem Modell geändert und die Auswirkung auf das Analyseergebnis dokumentiert. Als Zielgröße ist bei allen folgenden Darstellungen die globale Produktion von Sekundärlithium aus Traktionsbatterien angegeben.

3.2.3.1 Einfluss des Kathodenmaterials auf die Sekundärproduktion

Der Lithiumgehalt in einer Traktionsbatterie ist entscheidend für die Sekundärproduktion von Lithium und abhängig von der Wahl des Kathodenmaterials. Abb.3-14 stellt die Schwankungsbreite der Sekundärproduktion aus Traktionsbatterien dar, wenn einerseits nur LFP-Kathoden (untere Intervallgrenze) oder andererseits nur NMC-Kathoden (obere

Intervallgrenze) in den betrachteten Fahrzeugtypen eingesetzt werden. Im moderaten Szenario heißt dies, dass je nach Marktdurchdringung des Kathodentyps im Jahr 2050 mit 11.500 bis 18.000 Jahrestonnen Sekundärlithium aus Traktionsbatterien gerechnet werden kann. Im optimistischen Szenario hingegen können ca. 55.000 bis 85.000 Jahrestonnen erwartet werden.

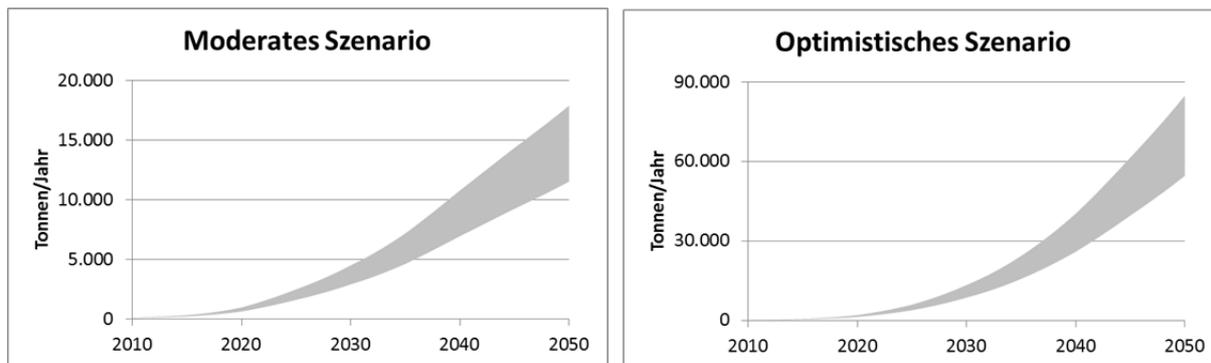


Abbildung 3-14 Sensitivitätsanalyse: Einfluss des Kathodenmaterials in Hybrid-, E- und Plug-In-Fahrzeugen auf die Sekundärproduktion von Lithium

3.2.3.2 Einfluss der Nutzungsdauer der Traktionsbatterie auf die Sekundärproduktion

Die Nutzungsdauer der Traktionsbatterie hat einen deutlich höheren Einfluss auf die Sekundärproduktion als die Wahl des Kathodenmaterials. In Abb.3-15 wurde erstere zwischen 5 (obere Intervallgrenze) und 15 Jahren (untere Intervallgrenze) variiert, was im Falle einer verkürzten Nutzungsdauer in einer möglichen Verdreifachung des Sekundärouputs im Jahr 2050 resultiert. Jedoch steigt bei einer verkürzten Nutzungsdauer auch die Gesamtnachfrage nach Lithium, so dass der Rezyklatanteil insgesamt gering bleibt.

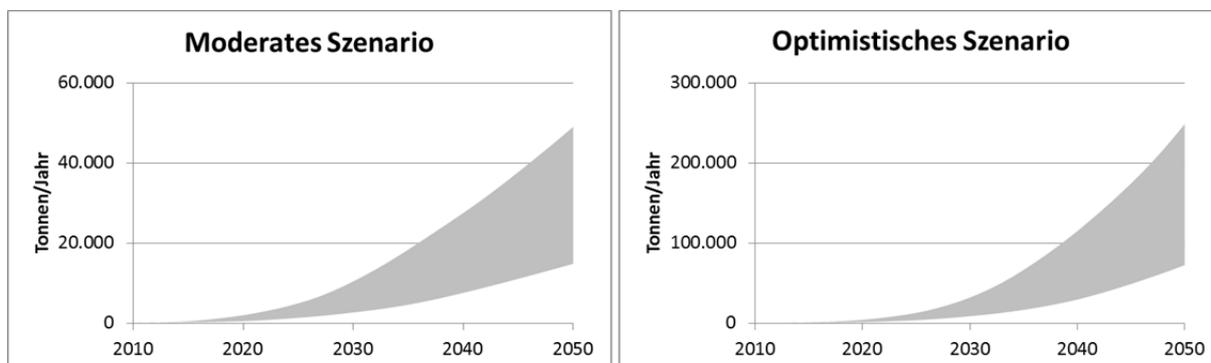


Abbildung 3-15 Sensitivitätsanalyse: Einfluss der Traktionsbatterie Nutzungsdauer auf die Sekundärproduktion von Lithium

4. Szenarien für den Batterierohstoff Kobalt

4.1 Allgemeine Szenarioannahmen

In diesem Kapitel werden die für den Rohstoff Kobalt spezifischen Annahmen herausgearbeitet. Da eins der zukünftigen Haupteinsatzgebiete von Kobalt, ebenso wie bei Lithium, das Kathodenmaterial von Traktionsbatterien sein könnte, werden alle unter 3.1.1 und 3.1.2.1 beschriebenen Annahmen bezüglich der Entwicklung des Fahrzeugmarkts und des Aufkommens von Traktionsbatterien übernommen.

4.1.1 Kobaltgewinnung aus Traktionsbatterien

4.1.1.1 Kobaltgehalt in Traktionsbatterien

Der Kobaltgehalt für die zwei Kathodentypen kann nach Einschätzung der Arbeitsgruppe wie folgt angenommen werden:

- NMC-Kathode: 490 g/kWh
- LFP-Kathode: 0 g/kWh

4.1.1.2 Wiedergewinnungsquoten von Kobalt aus Traktionsbatterien

Kobalt wird, im Gegensatz zu Lithium, schon heute stofflich aus Batterien wieder gewonnen. Somit kann hier auf den in der Praxis erzielten Wert von 85 % zurückgegriffen werden, der auch für das Recycling von Traktionsbatterien erwartet wird (Treffer 2011).

4.1.2 Nachfrage und Recycling weiterer Branchen

4.1.2.1 Wachstumsraten der Märkte

Die Datengrundlage, an der sich die Annahmen zur Entwicklung der Märkte bis 2050 orientieren, basiert auf CRU (2010). Es wird im Modell davon ausgegangen, dass weltweit die Nachfrage nach Kobalt von ca. 55.000 auf 250.000 Jahrestonnen ansteigt (Nachfrage ohne Traktionsbatterien). Für Europa wird eine Nachfragesteigerung von ca. 16.000 im Jahr 2010 auf 50.000 im Jahr 2050 Jahrestonnen angenommen. Da Volkswagen mit CRU eine Geheimhaltungsvereinbarung geschlossen hat, werden die Diagramme zur Nachfrageentwicklung der weiteren Branchen nicht in diesem Bericht dargestellt.

4.1.2.2 Nutzungsdauern

- Carbide: 10 Jahre

Carbide finden in solchen Bereichen Verwendung, wo hohe Verschleißwiderstände und Temperaturbeständigkeit erforderlich sind. Dazu zählen u. a. Werkzeuge für Maschinen und die Metallverarbeitung oder Anwendungen im Bergbau.

- Chemikalien: 3 Jahre

Dieser Marktsektor umfasst eine Reihe unterschiedlichster Anwendungen, die von Tierfutter und Pigmenten bis hin zu Polyester, Keramiken und Reifen reichen. Der Wert von 3 Jahren repräsentiert einen guten Durchschnitt.

- Gerätebatterien: 5 Jahre

vgl. 3.1.3.2

- Magnete: 5 Jahre

Kobalt ist in AlNiCo- und SmCo-Magneten enthalten. Für diese wird eine Nutzungsdauer von 5 Jahren veranschlagt.

- Spezialstähle: 10 Jahre

In Spezialstählen können geringe Zusätze von Kobalt die Temperaturbeständigkeit stark erhöhen. Sie werden in vielen Industrieanwendungen mit langen Nutzungsdauern eingesetzt.

- Superlegierungen: 10 Jahre

Kobalthaltige Superlegierungen werden überwiegend in langlebigen Produkten wie Prothesen und Bauteile für die Luftfahrt oder Energieerzeugung verwendet.

4.1.2.3 Sammelquoten recycelbarer Produkte

In der Literatur liegen keine Daten zu branchenspezifischen Sammelquoten vor. Nach Angaben der Europäischen Kommission beträgt der von UNEP geschätzte Rezyklatanteil von Kobalt ca. 30 % (European Commission 2010). Um sich diesen Wert anzunähern, einigte sich die Arbeitsgruppe darauf, eine pauschale Sammelquote von 50 % für alle Branchen exklusive des Batteriesektors zu veranschlagen. Für Gerätebatterien gelten, wie auch für Lithium, die in 3.1.3.3 genannten Werte von 20 % für den globalen und 40 % für den europäischen Bezugsraum.

4.1.2.4 Wiedergewinnungsquoten von Kobalt aus recycelbaren Produkten

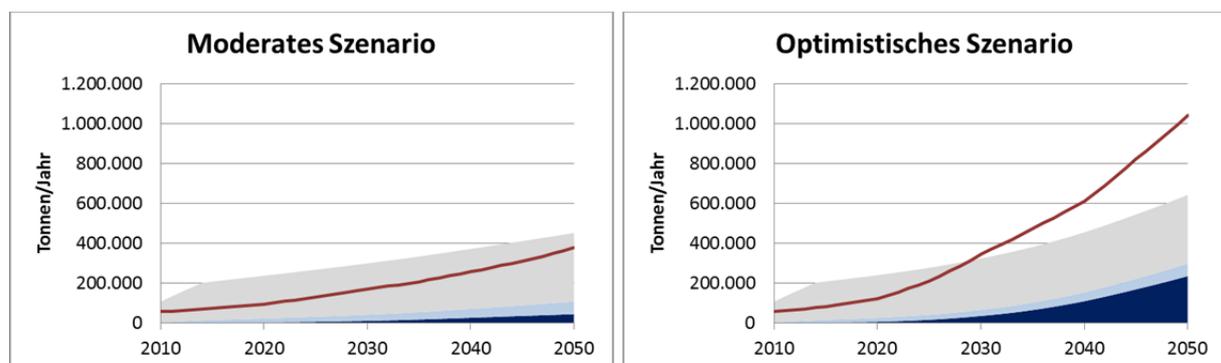
Aufgrund fehlender Detailinformationen wird für alle Branchen eine Wiedergewinnungsquote von 85 % angenommen.

4.2 Szenarioergebnisse Kobaltverfügbarkeit

4.2.1 Szenarioergebnisse für den globalen Bezugsraum

Bis 2050 steigt die Nachfrage im Szenario der moderaten Durchdringung der elektrifizierten Antriebe auf knapp 400.000 Jahrestonnen an, was einer Verachtfachung des heutigen Bedarfs entspricht (Abb.4-1). Da in diesem Szenario Hybridfahrzeuge den Markt dominieren und für diese im Modell zu 80 % Batterien mit LFP-Kathoden angenommen wurden, ist der Rezyklatanteil aus Traktionsbatterien eher gering. Insgesamt könnten im Jahr 2050 34 % der Nachfrage durch Sekundärmaterial gedeckt werden, wovon wiederum ein Drittel aus den Traktionsbatterien gewonnen wird. Im optimistischen Szenario beträgt die Sekundärproduktion ebenfalls ein Drittel der Nachfrage. Durch den verstärkten Einsatz von NMC-Kathoden in den E- und Plug-In-Fahrzeugen übersteigt jedoch nun der Rezyklatanteil aus den Traktionsbatterien deutlich denjenigen aus den restlichen Branchen.

Der in Abb.4-1 dargestellten möglichen Entwicklung der Primärproduktion liegen Daten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) zugrunde (Liedtke, Buchholz 2010). Die Datenreihe wurde ab dem Jahr 2024 extrapoliert. Während im moderaten Szenario die Deckung der Nachfrage unkritisch erscheint, könnte im optimistischen Szenario der Bedarf von über 1.000.000 Jahrestonnen nicht mehr gedeckt werden. Jedoch handelt es sich bei der Angebotskurve um eine reine Extrapolation der bis 2024 geplanten Projekte bis 2050, Annahmen zum Wirtschaftswachstum o.ä. sind somit nicht berücksichtigt. Auch hier gilt, dass sich das Angebot nach der Nachfrage richtet und die Kurve zunächst keine endgültige Begrenzung des Kapazitätsaufbaus beschreibt. Die Deckung der Nachfrage aus Sicht der geologischen Reserven und Ressourcen wird in Abb.4-2 aufgezeigt.



— Nachfrage
 ■ Sekundäres Kobalt aus Traktionsbatterien
 ■ Sekundäres Kobalt aus weiteren Branchen
 ■ Mögliche Primärproduktion

Abbildung 4-1 Globale Entwicklung von Nachfrage, Sekundärproduktion und möglichen Primärkapazitäten von Kobalt

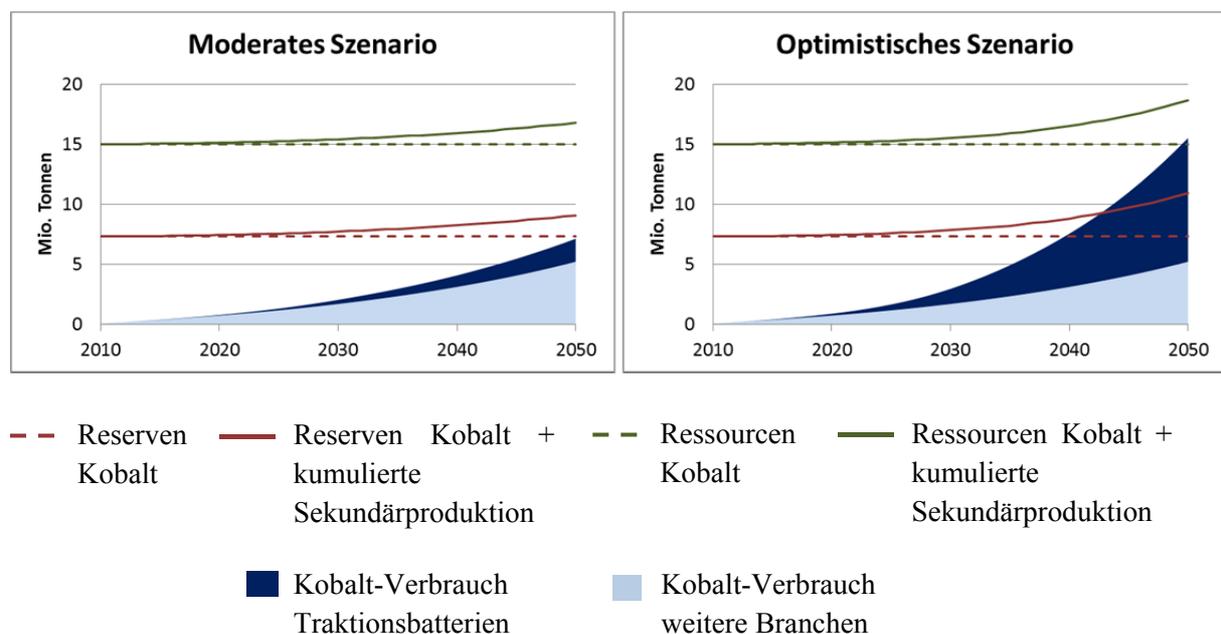


Abbildung 4-2 Bedeutung des kumulierten Kobalt-Verbrauchs für die geologischen Reserven und Ressourcen

Anders als bei Lithium erreicht der kumulierte Verbrauch die heute bekannten Reserven von 7,3 Mio. Tonnen (USGS 2011) im moderaten Szenario im Jahr 2050 bzw. überschreitet diese ab dem Jahr 2040 im optimistischen Szenario (Abb.4-2). Die weltweiten identifizierten Ressourcen von Kobalt werden vom USGS (2011) auf ca. 15 Mio. Tonnen geschätzt, also in etwa auf den bis 2050 kumulierten Bedarf im Fall der starken Marktdurchdringung von E-Fahrzeugen (optimistisches Szenario). Die Modellierung der Minenproduktion ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Die in Abb.4-1 gezeigten Daten zur möglichen Primärproduktion beruhen auf Angaben der BGR, die bis 2050 extrapoliert wurden. Aus Abb.4-2 ist jedoch ersichtlich, dass mit Blick auf die derzeit bekannten Reserven langfristig eine stetige Erhöhung der Produktionskapazitäten nur durch die Erschließung neuer geologischer Vorkommen realistisch ist.

Sowohl die Reserven als auch die Ressourcen werden um das Sekundärangebot von Kobalt ergänzt. Im Jahr 2050 beträgt die kumulierte Sekundärproduktion im optimistischen Szenario 3,6 Mio. Tonnen und leistet somit einen bemerkenswerten Beitrag zur Versorgungslage. Jedoch sei auch hier angemerkt, dass die angegebenen Reserven und Ressourcen als dynamische Größen gesehen werden müssen. Bei wachsendem Rohstoffbedarf ist eine Steigerung der Explorationstätigkeiten durchaus realistisch, wodurch neue Reserven und Ressourcen von Kobalt aufgefunden werden können.

4.2.2 Szenarioergebnisse für den europäischen Bezugsraum

In Europa kann bis 2050 mit einer Nachfragesteigerung von knapp 20.000 Tonnen/Jahr auf 66.000 Tonnen/Jahr im moderaten und auf 140.000 Tonnen/Jahr im optimistischen Szenario gerechnet werden (Abb.4-3). Dabei nehmen Traktionsbatterien einen Anteil an der Gesamtnachfrage von 20 % bzw. von knapp über 60 % ein. Im moderaten Szenario wird 2050 eine Sekundärproduktion von fast 23.000 Tonnen/Jahr erreicht, wobei die Sekundärproduktion aus den weiteren Branchen mit knapp 16.000 Jahrestonnen gegenüber derjenigen aus den Traktionsbatterien dominiert. Dieses Verhältnis kehrt sich im optimistischen Szenario um. Von den über 50.000 Jahrestonnen an Sekundärmaterial in 2050 werden nun ca. 36.000 Jahrestonnen aus Traktionsbatterien gewonnen. Für beide Szenarien gilt, dass der überwiegende Anteil an Sekundärströmen aus Traktionsbatterien (über 65 %) aus in E- und Plug-In-Fahrzeugen eingesetzten Traktionsbatterien zu erwarten ist.

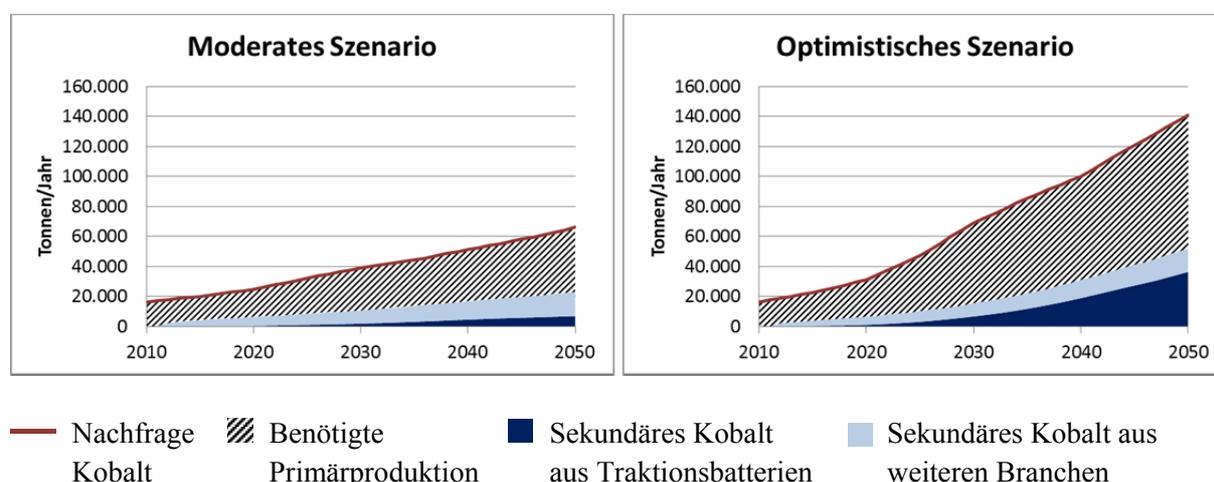


Abbildung 4-3 Entwicklung von Nachfrage, Sekundärproduktion und benötigter Primärproduktion von Kobalt in Europa

4.2.3 Sensitivitätsanalysen ausgewählter Systeme

4.2.3.1 Einfluss des Kathodenmaterials auf die Sekundärproduktion aus Alt-Traktionsbatterien

Für die Variation der Nutzungsdauer der Traktionsbatterie gilt, wie auch bei Lithium, dass eine Reduzierung der Nutzungsdauer in gleichem Maße zu einer Erhöhung der Sekundärproduktion führt. Signifikante Unterschiede sind jedoch beim Einfluss des gewählten Kathodenmaterials zu beobachten (Abb.4-4). Da LFP-Kathoden kein Kobalt enthalten, ist die Schwankungsbreite der Sekundärproduktion bei einer unterschiedlichen Marktdurchdringung des Kathodenmaterials extrem groß. Im moderaten Szenario reicht sie von 0 Tonnen/Jahr bis 75.000 Tonnen/Jahr, im optimistischen Szenario von 0 Tonnen/Jahr bis 360.000 Tonnen/Jahr. Im Vergleich zu Lithium sind die Unsicherheiten bezüglich des aufkommenden Sekundärmaterials somit deutlich größer.

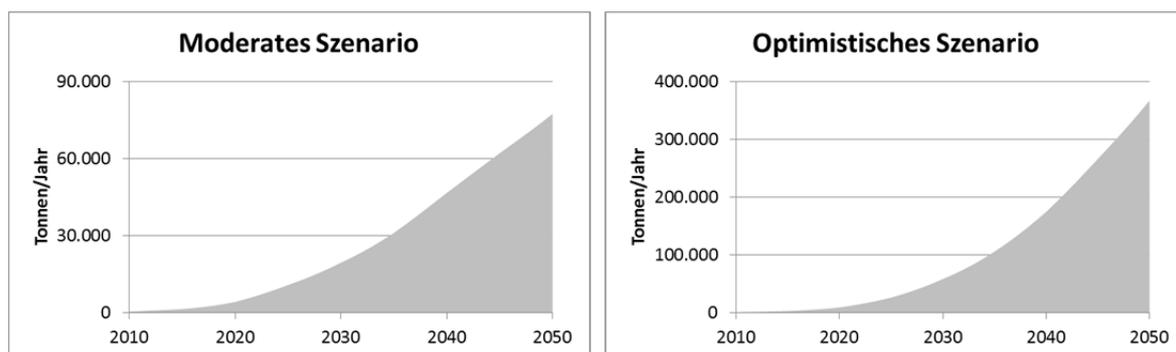


Abbildung 4-4 Sensitivitätsanalyse: Einfluss des Kathodenmaterials auf die Sekundärproduktion von Kobalt

4.2.3.2 Einfluss der Sammelquote auf die Sekundärproduktion aus weiteren Branchen

Die globale Sammelquote der weiteren Branchen wurde aufgrund fehlender Literaturwerte von der Arbeitsgruppe auf 50 % geschätzt. Wie in 4.2.1 beschrieben, resultiert daraus in 2050 ein Rezyklatanteil von ca. 30 %. Dieser Wert wird nach Angaben der Europäischen Kommission bereits heute als realistisch angesehen (siehe 4.1.2.3). Da es sich bei diesen Angaben jedoch auch um einen Schätzwert handelt und die daraus abgeleitete Sammelquote der weiteren Branchen mit hohen Unsicherheiten belastet ist, wird der Effekt letzterer auf die Sekundärproduktion der weiteren Branchen in Abb. 4-5 dargestellt. Bei einer Variation der Sammelquote zwischen 5 % und 70 % kann in den Szenarien mit einer Rezyklatmenge zwischen 20.000 Tonnen/Jahr und 83.000 Tonnen/Jahr aus den weiteren Branchen gerechnet werden.

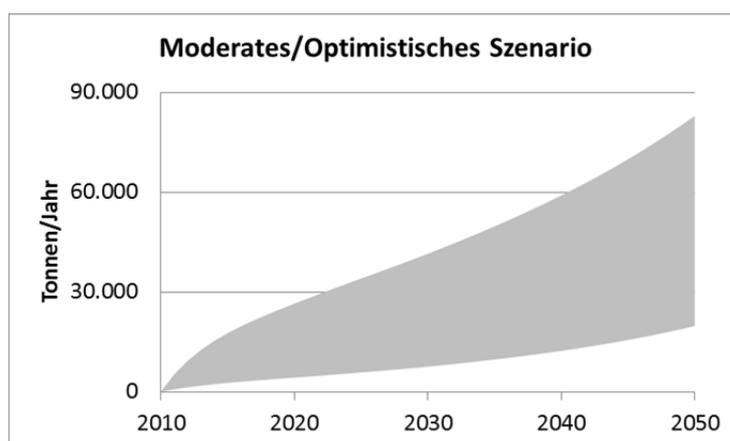


Abbildung 4-5 Sensitivitätsanalyse: Einfluss der Sammelquote auf die Sekundärproduktion aus weiteren Branchen

5. Fazit

Der gewählte System Dynamics-Ansatz ist ein praxistaugliches Instrument zur Abschätzung von Rohstoffverfügbarkeiten unter besonderer Berücksichtigung des Potenzials von Sekundärrohstoffen. Die Übertragbarkeit der Daten hinsichtlich der angenommenen Fahrzeugmarktentwicklung und weiterer systemrelevanter Parameter ermöglichte es, das Kobalt-Modell mit einem geringen zeitlichen Aufwand aus dem Lithium-Modell zu generieren.

Die Verfügbarkeitsanalysen machen deutlich, dass sekundäres Material aus Traktionsbatterien erst ab 2030 eine zunehmend bedeutende Rolle bei der globalen und europäischen Versorgung spielen könnte. Der überwiegende Anteil des kontinuierlich steigenden Bedarfs muss auch danach sowohl für das moderate, als auch für das optimistische Szenario durch den Primärrohstoff gedeckt werden.

Die zukünftige Entwicklung der E-Mobilität hat einen immensen Einfluss auf die Nachfrage nach den Batterierohstoffen Lithium und Kobalt. Jedoch bergen die Annahmen zur Entwicklung des Fahrzeugmarkts ebenso die größten Unsicherheiten. Die Szenarien zu den unterschiedlichen Marktdurchdringungen der E-Mobilität zeigen, in welchem Rahmen sich Nachfrage und Sekundärproduktion bewegen können. Mit Sensitivitätsanalysen wird zusätzlich der Einfluss ausgewählter Systemparameter wie die Nutzungsdauer von Traktionsbatterien bzw. die Marktdurchdringung des Kathodenmaterials auf die Sekundärproduktion aufgezeigt.

Selbst bei einer starken Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen (optimistisches Szenario) sind die geologischen Reserven von Lithium ausreichend, um den hohen Rohstoffbedarf zu decken. Anders stellt sich die Situation bei Kobalt dar: hier reichen die heute bekannten Reserven unter den getroffenen Annahmen bei einer starken Marktdurchdringung nicht aus. Zieht man jedoch jene Vorkommen in Betracht, die zwar bekannt, jedoch heute noch nicht wirtschaftlich abbaubar sind, kann auch hier eine Deckung der Nachfrage bis 2050 gewährleistet werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, durch Exploration neue Kobaltvorkommen aufzufinden und somit die geologischen Reserven und identifizierten Ressourcen zu erhöhen. Die Sekundärproduktion von Kobalt leistet zudem einen entscheidenden Beitrag zur Versorgung. Außerdem existiert mit LFP-Kathoden heute schon eine Alternative zu NMC-Kathoden und nach weiteren leistungsstarken und kobaltfreien Kathoden wird bereits geforscht.

Die Modellierung des Aufkommens von Traktionsbatterien in Sammelstellen zeigt, dass in den beiden dargestellten Szenarien bis 2020 Recyclingkapazitäten von 3.500.000 Traktionsbatterien pro Jahr aufgebaut werden sollten, davon ca. ein Fünftel in Europa. Bis zum Jahr 2020 verläuft die Entwicklung des Fahrzeugmarkts in beiden Szenarien noch relativ ähnlich, erst danach steigen im optimistischen Szenario die Neuzulassungen von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antrieben stark an. Im Jahr 2020 wird sich die zukünftige Entwicklung des

Elektromobilitätsmarktes bereits deutlicher abgezeichnet haben, sodass eine sinnvolle und bedarfsgerechte Anlagenplanung für die folgenden Jahre möglich ist.

6. Quellenverzeichnis

- ACEA Press Releases: New Vehicle Registrations 2008. Herausgegeben von ACEA. (aufgerufen am 05.04.2011)
- Angerer, G.; Marscheider-Weidemann, F.; Wendl, M.; Wietschel, M. (2010): Lithium für Zukunftstechnologien. Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Herausgegeben von Fraunhofer ISI.
- ARN (The Auto & Recycling Foundation and Auto Recycling Nederland) (2001): Environmental Report 2000.
- Evonik (2011) a.: Verweildauer Traktionsbatterien in Re-Use Anwendungen. E-Mail von E.-R. Bareschee an S. Konietzko.
- Evonik (2011) b.: Nutzungsdauer von Li-Ionen-Batterien. E-Mail von E.-R. Bareschee an S. Konietzko.
- CRU (2010): The Outlook for Cobalt 2010. London.
- Deloitte (2010): Gaining traction. A customer view of electric vehicle mass adoption in the U.S. automotive market.
- Deutsche Gesellschaft für System Dynamics e.V., www.systemdynamics.de (aufgerufen am 17.03.2011).
- Ericsson, M. (2009): Rohstoffmärkte – Aussichten und zunehmende Abhängigkeiten. In: In Globale Rohstoffpolitik – Herausforderungen für Sicherheit, Entwicklung und Umwelt .
- European Commission (2010): Annex V to the Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Unter Mitarbeit von Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials.
- Forrester, J. W. (1971): Counterintuitive Behavior of Social Systems. In: Technology Review, Jg. 73, H. 3, S. 52–68.
- Forrester, J.W. (1994): System Dynamics, Systems Thinking, and Soft OR. In: System Dynamics Review, Jg. 10, H. 2
- Fulton, L.; Eads, G. (2004): IEA/SMP Model Documentation and Reference Case Projection. Herausgegeben von WBCSD.
- GRS Batterien (2011): Jahresbericht 2010. Mit Erfolgskontrolle nach Batteriegesetz. Herausgegeben von Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien.
- Liedtke, M.; Buchholz, P. (2010): Rohstoffrisikobewertung für Metalle – Kobalt. Herausgegeben von Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (im Auftrag der Volkswagen AG). Hannover.

- Melhart, G; Merz, C.; Akkermans, L.; Jorgal-Jørgensen, J. (2011): European second-hand car market analysis – Final report.
- McKinsey (2011): Boost! Transforming the powertrain value chain - a portfolio challenge.
- Karpel, S. (2002): Ready for a scrap. In: Metal Bulletin Monthly, März 2002, S. 38–45
- Roskill (2009): The Economics of Lithium 2009. 11th edition. London.
- Schmidt, A. (2005): Situationsanalyse zum Batterierecycling. Herausgegeben von Umweltamt Erlangen - Team Abfallberatung.
- System Dynamics Society, www.systemdynamics.org (aufgerufen am 17.03.2011).
- Treffer, F. (25.01.2011): Wiedergewinnungsquoten von Kobalt aus Traktionsbatterien. E-Mail an Stella Konietzko.
- TRU Group Inc. (2011): Shocking Future Battering the Lithium Industry through 2020. Unter Mitarbeit von E. R. Anderson.
- USGS (2011): Minerals Yearbook 2010.
- Valentine-Urbschat, M.; Bernhart, W. (2009): Powertrain 2020 - The future drives electric. Herausgegeben von Roland Berger Strategy Consultants.
- van Schaik, A.; Reuter, M. A.; Boin, U. M. J.; Dalmijn, W. L. (2002): Dynamic modelling and optimisation of the resource cycle of passenger vehicles. In: Minerals Engineering, Jg. 15, S. 1001–1016.
- Wendl, M. (Oktober 2009): Abschätzung des künftigen Angebot-Nachfrage-Verhältnisses von Lithium vor dem Hintergrund des steigenden Verbrauchs in der Elektromobilität.
- Wietschel, M.; Dallinger, D.: Quo vadis Elektromobilität. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 58 (12), S. 8–15.
- Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Wirtschaftsförderung Region Stuttgart Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (2010): Strukturstudie BWe mobil. Baden-Württemberg auf dem Weg zur Elektromobilität. Herausgegeben von Wirtschaftsförderung Region Stuttgart Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg. Stuttgart.