■ Im Jahr 2020 ist der weltweite Bestand an Elektro-Pkw auf 10,9 Millionen gestiegen [1] – ein Plus von mehr als drei Millionen gegenüber dem Vorjahr. China liegt mit gut fünf Millionen Einheiten im Bestand weiter unangefochten auf Platz eins, gefolgt von den USA mit 1,77 Millionen. Deutschland hat sich mit fast 570.000 Elektrofahrzeugen auf Rang drei vorgearbeitet [1]. Die Zahl der Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen stieg 2020 weltweit auf ein neues Rekordhoch von 3,18 Millionen Einheiten. Ab 2030 könnte ihr Anteil sogar zwischen 25 und 75 % der Neuzulassungen liegen. Dies führt zu einer Batterienachfrage von 1 bis 6 TWh/a – je nachdem, welche Studie zugrunde gelegt wird [2].

Mit der weiteren Verbreitung der Elektromobilität steigt auch der Bedarf an speziellen Rohstoffen für die Fahrzeuge, und hier insbesondere für die Energiespeicher. Bei Lithium-Ionen-Batterien, die allen Prognosen zufolge auch in den kommenden zehn Jahren das Maß der Dinge im Elektrofahrzeug

sein werden, sind das vor allem die chemischen Elemente Graphit, Kobalt, Lithium, Mangan und Nickel. Trotz Weiterentwicklungen bei der Zellchemie wird sich der Gewichtsanteil von Lithium mit etwa 72 g/kg Zellgewicht Abschätzungen des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) zufolge in diesem Zeitraum nicht wesentlich verringern lassen, jedoch könnte wahrscheinlich der von Kobalt deutlich von 200 g/kg Zellgewicht auf 60 g/kg sinken. Die Primärmaterialnachfrage für die Produktion von Fahrzeugbatterien dürfte demnach 2030 bei 250.000 bis 450.000 t für Lithium, 250.000 bis 420.000 t für Kobalt und 1,3 bis 2,4 Millionen t für Nickel liegen [2].

BEWERTUNG DER ROHSTOFFVORKOMMEN

Bei der Bewertung von Rohstoffvorkommen müssen grundsätzlich zwei unterschiedliche Werte betrachtet werden: einerseits die generell auf der Erde zur

Verfügung stehenden Ressourcen, andererseits die mit heutigen Technologien zu heutigen Marktpreisen wirtschaftlich sinnvoll abbaubaren Vorkommen. An dieser Stelle kann für Lithium-Ionen-Fahrzeugbatterien Entwarnung gegeben werden: Es gilt als wissenschaftlich abgesichert, dass ausreichend Rohstoffe vorhanden sind. Die Gesamtvorkommen übersteigen den prognostizierten Bedarf meist deutlich, selbst wenn der Rohstoffbedarf durch mehr Nachfrage in anderen Anwendungsbereichen parallel steigen würde.

Allerdings weisen viele Studien darauf hin, dass temporäre Verknappungen oder Preissteigerungen für einzelne Rohstoffe nicht auszuschließen sind, zum Beispiel falls neue Förderstätten erschlossen werden müssen, die Nachfrage zu groß wird oder der Export aus den Förderländern ins Stocken gerät [2]. Dabei ist die Situation bei den einzelnen Metallen sehr unterschiedlich, wie eine detaillierte Betrachtung und Bewertung der Deutschen Rohstoffagentur (Dera)

Batterierohstoffe – Woher und wohin?

Steigende Marktanteile von Elektro-Pkw bedeuten größere Batteriestückzahlen und damit einen wachsenden Rohstoffbedarf. Insbesondere in der Hochlaufphase der Elektromobilität sind dabei vereinzelt Versorgungsengpässe zu befürchten; später können Recyclingkonzepte für alte Zellen zu einer Entspannung der Lage beitragen.

zeigt [3], die im Folgenden für die fünf chemischen Elemente genauer dargestellt werden soll.

GRAFIT

Grafit wird in Lithium-Ionen-Batterien als Anodenmaterial verwendet. Es hat den höchsten Volumenanteil aller Batterierohstoffe und spielt auch hinsichtlich der Kosten eine wichtige Rolle in der Zellproduktion. China dominiert seit Jahren fast die gesamte Lieferkette und hat einen Anteil von knapp 50 % an der weltweiten Produktion von synthetischem Grafit sowie von rund 70 % an der Gewinnung von Flockengrafit, das für die Verwendung in Batterien noch vorbehandelt werden muss. Seit einigen Jahren gibt es verstärkt Explorationsbemühungen insbesondere in Afrika; neue Abbaustätten in Mosambik, Tansania und Madagaskar könnten zu einer Entspannung auf dem hochkonzentrierten Weltmarkt beitragen. Allerdings belasten Risiken bei der Weiterverarbeitung von

Lithiumbedarf für die europäische Elektrofahrzeug-Batterieproduktion 2030 in Abhängigkeit von der Zellfertigungskapazität (NMC 811: 80 % Nickel, 10 % Mangan, 10 % Kobalt; NMC 622: 60 % Nickel, 20 % Mangan, 20 % Kobalt)

Flockengrafit weiterhin eine sichere Versorgung, da diese aktuell fast ausschließlich in China stattfindet, ebenso wie die Anodenproduktion an sich. Aktuelle Batterieforschungen umfassen auch neue Anodenmaterialien [4], deren Serienumsetzung künftig Auswirkungen auf den Grafitbedarf haben könnte.

KOBALT

Kobalt wird wie Nickel und Mangan für die Batteriekathoden benötigt. Es weist aktuell die höchsten Beschaffungsrisiken aller Batterierohstoffe auf. Das liegt insbesondere an der erwarteten dynamischen Nachfrage und an daraus folgenden potenziellen Versorgungsengpässen. „Auf Grundlage der aktuellen Nachfrageszenarien könnte der Kobaltbedarf für die Elektromobilität im Jahr 2030 auf bis zu 315.000 t ansteigen – im Vergleich zu heute eine Verzwanzigfachung“, sagt Siyamend Al Barazi von der Dera. Die Weiterentwicklung

von kobaltarmen oder sogar kobaltfreien Kathoden könnte den Gesamtbedarf deutlich reduzieren. Vor allem die Rolle der Demokratischen Republik Kongo – dem mit Abstand größten Förderland – führt zu hohen Risiken in der strategischen Planung. „Seit über zehn Jahren dominiert die dortige Kobaltförderung mit einem Marktanteil von derzeit 69 % den Weltmarkt, und das Land könnte die Förderung bei weiter steigender Nachfrage noch deutlich ausbauen“, erklärt Al Barazi.

LITHIUM

Da der Lithiummarkt relativ klein ist, fällt der erwartete Nachfrageanstieg in Relation zur heutigen Produktion besonders hoch aus. „Unsere Berechnungen zeigen, dass sich das Angebot bis 2026 verdreifachen müsste, um allein den kommenden Bedarf abzudecken“, sagt Michael Schmidt von der Dera. Die Förderung von Lithium

ist heute einerseits auf die Länder Australien, Chile und Argentinien und andererseits auf nur wenige Firmen konzentriert, vier Unternehmen kontrollieren fast 60 % der globalen Produktion. Der Lithiumboom der vergangenen Jahre hat jedoch gezeigt, dass der Lithiummarkt vor großen Veränderungen steht. Neben der Erweiterung bestehender Anlagen werden auch in anderen Ländern wie Kanada, Mexiko oder Bolivien große Projekte geplant und umgesetzt, aber auch Europa verfügt über vielfältige Potenziale. Ein Lithiumengpass ist aktuell nicht zu befürchten, allerdings verweisen Experten darauf, dass die hohe Angebotskonzentration auf nur wenige Lieferländer bestehen bleiben wird. „Zudem haben sich vor allem asiatische Batteriehersteller durch langfristige Lieferverträge und Firmenbeteiligungen große Kontingente gesichert, was die frei verfügbare Lithiummenge auf dem Weltmarkt stark reduziert“, so Schmidt.

Globale bergbauliche Lithiumproduktion 2015 und Reserven (Farbgebung der Länder bezieht sich auf die Reserven; Daten in den Ländern stellen die Jahresproduktion dar)

© [M] Agora Verkehrswende

MANGAN

Für den Manganmarkt spielen Batterieanwendungen lediglich eine untergeordnete Rolle. Hauptabnehmerin von Mangan bleibt die Stahlindustrie mit einem Anteil von 90 %. Aktuell werden nur etwa 0,2 % des weltweit geförderten Mangans für Lithium-Ionen-Batterien verwendet, und auch künftig wird der Anteil für diese Anwendung bei nur rund 1 % liegen.

NICKEL

Die globale Nickelnachfrage zur Produktion von Lithium-Ionen-Batterien betrug im Jahr 2019 bereits mehr als 150.000 t [3]. Dies sind weniger als 5 % des weltweiten Marktvolumens von Primärnickel. Bis 2025 könnte sich die Nachfrage aus dem Bereich Elektromobilität auf jährlich rund 500.000 t ausweiten und dann bereits rund 15 % des weltweiten Gesamtmarkts ausmachen. Um die Energiedichte in Lithium-Ionen-Batterien zu vergrößern,

werden die Nickelanteile in optimierten Zellen deutlich erhöht, sodass der Bedarf künftig überproportional zur Batterieproduktion steigen wird. Für Lithium-Ionen-Batterien wird Nickelsulfat benötigt, ein Nischenprodukt, das auch aus sogenanntem Klasse-I-Nickel (Reinheit über 99 %) gewonnen wird. Um die zukünftig steigende Nachfrage zu bedienen, müssen neue Herstellungswege für Nickelsulfat etabliert werden. Dabei hängt viel vom Primärnickelangebot aus Südostasien ab, hier insbesondere von Indonesien, dem mit Abstand weltweit größten Bergwerksproduzenten von Nickel. Seit 2020 untersagt Indonesien den Export von Nickelerzen, um weite Teile der Wertschöpfungskette im eigenen Land zu etablieren. Mittlerweile ist das Land nach China bereits der weltweit zweitgrößte Nickelproduzent, allerdings bisher nur von sogenanntem Klasse-II-Nickel (Reinheit unter 99 %). Zahlreiche Projekte in Indonesien zielen darauf ab, künftig

auch höherwertige Nickelprodukte für die Batterieherstellung anzubieten.

RECYCLING VON LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

Um die Abhängigkeit von den genannten Rohstoff-Förderländern zu reduzieren, wird künftig eine umfassende Recyclingstruktur immer mehr an Bedeutung gewinnen. Für kleine Speichereinheiten, beispielsweise aus Mobiltelefonen, werden Verfahren zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus Lithium-Ionen-Batterien teilweise schon umgesetzt. Allerdings sind Fahrzeugbatterien wesentlich größer, schwerer und leistungsfähiger, sodass sich die Industrialisierung der Recyclingverfahren komplexer gestaltet. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie fördert im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand gemeinsam mit Vinnova aus Schweden das Forschungsprojekt Libero der RWTH Aachen. Das deutsch-schwedische Konsortium mit

Tero Holländer

Head of Business Line Batteries bei Fortum

jeweils zwei Partnern aus Industrie und Forschung arbeitet an einem robusten, flexiblen und möglichst abfallfreien Prozess zum Batterierecycling. Ziel des seit 2019 laufenden Projekts ist die Planung einer Anlage mit einer jährlichen Recyclingkapazität von 25.000 t Batteriemasse [5]. In Finnland hat das halbstaatliche Unternehmen Fortum einen Prozess für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien von Elektrofahrzeugen entwickelt [6].

Einer der Vorreiter auf dem Gebiet des kommerziellen Batterierecyclings ist Umicore. Das vom Unternehmen eingesetzte Verfahren setzt sich aus einem pyro- und einem hydrometallurgischen Prozess zusammen. Aus der thermischen Verwertung entstehen eine Legierung, die Kobalt, Nickel und Kupfer enthält, und eine Schlackenfraktion. Die Metallrückgewinnung erfolgt durch die anschließende hydrometallurgische Bearbeitung. Die erste Recyclinganlage von Umicore hat eine Kapazität von 7000 t Batteriemasse pro Jahr, was umgerechnet rund 35.000 Elektrofahrzeugbatterien entspricht.

Volkswagen hat Anfang 2021 am Standort Salzgitter eine Pilotanlage für das Recycling von Hochvolt-Fahrzeugbatterien in Betrieb genommen. Lithium, Nickel, Mangan und Kobalt sollen dabei zu 100 % und Aluminium, Kupfer und

2 FRAGEN AN ...

Welche Besonderheiten bietet Ihr Recyclingkonzept für Lithium-Ionen-Batterien von Elektrofahrzeugen?

HOLLÄNDER _ Der traditionelle Weg, Lithium-Ionen-Batterien zu recyceln, ist ein thermischer Ansatz. Fortum verwendet eine Kombination aus mechanischem und hydrometallurgischem Recycling, die einen deutlich geringeren CO₂-Fußabdruck hat. Mit dieser Technologie ist auch die Fähigkeit, verschiedene Metalle zu trennen, viel besser gegeben, und ein viel größerer Anteil der aktiven Materialien der Batterie wird zurückgewonnen. Mit anderen Worten: Wir sind in der Lage, bis zu 95 % der knappen und wertvollen Metalle in der schwarzen Masse einer Batterie zurückzugewinnen. Unser eigenes Verfahren zur Lithiumseparation haben wir Anfang dieses Jahres patentieren lassen.

Wann rechnen Sie mit der Industrialisierung des Verfahrens, wann werden ausreichend Batterien für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage zur Verfügung stehen?

HOLLÄNDER _ Wir arbeiten bereits im industriellen Maßstab. Unsere derzeitige Recyclingkapazität liegt bei etwa 3000 t pro Jahr, was etwa 10.000 Elektroautobatterien entspricht. Unsere mechanische Recyclinganlage in Ikaalinen befindet sich derzeit in der Hochlaufphase, zudem betreiben wir eine industrielle Pilotanlage für hydrometallurgisches Recycling in Harjavalta. Unser Ziel ist es, eine größere hydrometallurgische Anlage in Harjavalta zu errichten, die es uns ermöglicht, in Zukunft eine noch größere Menge an Materialien zu verarbeiten.

Kunststoff zu 90 % wiederverwertet werden [7]. Die Anlage ist zunächst darauf ausgelegt, bis zu 3600 Batteriesysteme im Jahr zu recyceln – das entspricht rund 1500 t Batteriemasse. Später, wenn eine größere Anzahl von Altbatterien zur Verfügung steht, kann das System auf größere Mengen skaliert werden. Der Recyclingprozess kommt laut Volkswagen ohne das energetisch aufwendige Einschmelzen im Hochofen aus. Die angelieferten gebrauchten Batterie-

systeme werden tiefenentladen und demontiert. Dann werden die Einzelteile im Zerkleinerer zu Granulat zerkleinert, das anschließend getrocknet wird. Dabei wird neben Aluminium, Kupfer und Kunststoffen vor allem ein schwarzes, pulverförmiges Gemisch gewonnen, das die wichtigen Batterierohstoffe Lithium, Nickel, Mangan und Kobalt sowie Graphit enthält. Die Trennung und Aufbereitung der einzelnen Stoffe durch hydrometallurgi-

Recyclingfähiges Material	Gewichtsanteil [kg] (bezogen auf eine Batteriegesamtmassse von 400 kg)
Aluminium	126
Graphit	71
Nickel	41
Elektrolyt	37
Kupfer	22
Kunststoff	21
Mangan	12
Kobalt	9
Elektronik	9
Lithium	8
Stahl	3
Rest	41

Gewichtsanteil des recyclingfähigen Materials einer Lithium-Ionen-Batterie (Quelle: Volkswagen)

sche Verfahren – unter Verwendung von Wasser und chemischen Mitteln – erfolgt im Nachgang bei spezialisierten Partnern.

„Wesentliche Bestandteile alter Batteriezellen können so bei der Herstellung von neuem Kathodenmaterial genutzt werden“, erklärt Mark Möller als Leiter des Geschäftsbereichs Technische Entwicklung & E-Mobilität bei Volkswagen Group Components. „Da die Nachfrage nach Batterien und damit nach den Rohstoffen stark steigen wird, können wir jedes Gramm zurückgewonnenes Material gut gebrauchen.“ Das denken wohl auch andere Automobilhersteller, etwa Mercedes-Benz. Wie das Unternehmen auf Nachfrage erklärt, ist eine Recyclinganlage für Hochvoltbatterien am Standort Gaggenau geplant.

SECOND-LIFE-ANSATZ

Die Weiterverwertung ausgemusterter Fahrzeugbatterien im stationären Bereich könnte die Nutzungsdauer der Energiespeicher verlängern, bevor sie in den stofflichen Recyclingzyklus überführt werden. Praktische Erfahrungen, wie viele Batterien den Anforderungen der Zweitverwertung bezüglich verbleibender Speicherkapazität und Restlebensdauer in der Praxis gerecht werden, fehlen bisher. Generell ist das sogenannte Second-Life-Konzept nur für Anwendungsfälle geeignet, die mit gealterten Batterien mit niedriger Energiedichte auskommen. Auch müssen noch Fragen der Standardisierung und Gewährleistung geklärt werden [8].

Gegenüber neuen Batterien sind nach Einschätzungen des Fraunhofer ISI höhere Ausfall- und Austauschraten zu erwarten, was dem Ansatz hoher Funktionssicherheit dezentraler Energiespeicher beispielsweise für Ein- oder Mehrfamilienhäuser zuwiderläuft. Durch die notwendige Redundanz der Batteriezellen würde zudem die Anzahl der benötigten Zellen und damit der Aufwand für den Speicher zunehmen. Das Fraunhofer ISI geht davon aus, dass nur ein Bruchteil der ausgemusterten Traktionsbatterien tatsächlich ein zweites Leben erhält [2].

Richard Backhaus

LITERATURHINWEISE

- [1] Elektroautos: Bestand steigt weltweit auf 10,9 Millionen. Online: <https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/elektroautos-bestand-steigt-weltweit-auf-109-millionen.html>, aufgerufen: 27. April 2021
- [2] Thielmann, A. et al.: Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. Online: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>, aufgerufen: 27. April 2021
- [3] Al Barazi, S. et al.: Batterierohstoffe für die Elektromobilität. Online: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-21.pdf?jsessionid=396E609556CA74734128C336131440D7.1_cid331?__blob=publicationFile&v=2, aufgerufen: 27. April 2021
- [4] Schäfer, P.: Neues Anodenmaterial für leistungsfähigere Li-Ion-Batterien. Online: <https://www.springerprofessional.de/batterie/werkstoffe/neues-anodenmaterial-fuer-leistungsfahigere-li-ion-batterien/18497460>, aufgerufen: 18. Mai 2021
- [5] RWTH Aachen: RWTH plant Pilotanlage für das Recycling von 25.000 Tonnen Batterien. Online: <https://www.rwth-aachen.de/go/id/dzeoz?#aaaaaaaaadzewc>, aufgerufen: 27. April 2021
- [6] Reichenbach, M.: Finnland startet mit nationaler Batteriestrategie durch. Online: <https://www.springerprofessional.de/link/19155626>, aufgerufen: 18. Mai 2021
- [7] Volkswagen: Aus alt mach neu: Volkswagen Group Components startet Batterie-Recycling. Online: <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/aus-alt-mach-neu-volkswagen-group-components-startet-batterie-recycling-6789>, aufgerufen: 27. April 2021
- [8] Köllner, C.: Faktencheck Elektroauto-Batterien. Online: <https://www.springerprofessional.de/batterie/elektrofahrzeuge/faktencheck-elektroauto-batterien/17624376>, aufgerufen: 18. Mai 2021

MEINUNG

„Wie immer gilt auch bei der Rohstoffversorgung für Lithium-Ionen-Batterien, dass das Gesamtsystem nur so robust ist wie das schwächste Glied in der Kette. Die Batterieproduktion wird nur reibungslos laufen, wenn alle benötigten Rohstoffe zur richtigen Zeit in ausreichender Menge verfügbar sind. Damit das im Sinne eines schnellen Ausbaus der Elektromobilität gelingt, müssen alle Beteiligten in Politik und Wirtschaft auf internationaler Ebene an einem Strang ziehen. Dass sich kleine Probleme in der Lieferkette fatal auf die gesamte Automobilproduktion auswirken können, zeigen die Havarie im Suezkanal und die fehlenden Elektronikkomponenten aufgrund der Covid-19-Pandemie.“

Richard Backhaus

ist Korrespondent von ATZ | MTZ | ATZelektronik.