

23.01.2024

# KURZPAPIER ZU INNOVATIONEN BEI FÖRDERUNG, SUBSTITUTION, NUTZUNG UND RECYCLING VON ROHSTOFFEN

## Executive Summary

### 1 Ausgangslage

Der Bedarf an kritischen Rohstoffen steigt durch die Twin Transformation, den Übergang in eine nachhaltige und digitalisierte Automobilindustrie, rasant an. Um die ausreichende Versorgung mit kritischen Rohstoffen und Zwischenprodukten sicherzustellen, treffen Unternehmen bereits umfangreiche Maßnahmen. Zusätzlich kann ein breites Portfolio an politischen unterstützenden Maßnahmen sinnvoll sein (vgl. [Rohstoff-Papier des ETA](#)). Ein weiterer wichtiger Faktor sind Innovationen – sie können dabei helfen, die Versorgung mit kritischen Rohstoffen und Zwischenprodukten resilienter zu gestalten. Prognosen gehen etwa davon aus, dass durch technologische Innovationen bis 2040 etwa 25 % des Gesamtbedarfs an derzeit kritischen Rohstoffen für die Batterieproduktion substituiert werden kann<sup>1</sup>. Welche Innovationen sind in der Lage, unsere Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen zu reduzieren? Welcher Rahmenbedingungen bedarf es, dass solche Innovationen sich entwickeln können und umgesetzt werden? Dieses Dokument dient dazu, diese Fragen zu beleuchten. Wesentliche Grundlage der folgenden Ausarbeitung ist eine vom ETA beauftragte [Begleitstudie](#).

Die zentrale Herausforderung dabei ist, dass Resilienz vor allem durch Redundanzen entsteht. Unternehmen treffen bereits umfangreiche Maßnahmen, um ihre Resilienz zu steigern. Diese Absicherung und Weit-sicht können viele Unternehmen, die im Wettbewerb unter großem Preisdruck agieren, allein nicht leisten, wenn ihre Konkurrenten diese Redundanzen nicht aufbauen. Hier kann der Staat mit den passenden regulatorischen Rahmenbedingungen, Förderung und Veränderung der Anreizstrukturen das Engagement der Unternehmen stützen und so Marktversagen bei der Förderung von Resilienz mit marktwirtschaftlichen Instrumenten beseitigen.

Die Innovationen für eine resilientere Rohstoffversorgung der Automobilwirtschaft greifen in ganz unterschiedlichen Bereichen:

---

<sup>1</sup> Zitiert nach Vortrag auf der Sachverständigen-Anhörung am 19.09.2023 aus einer noch unveröffentlichten Studie.

## 1.1 Innovationspotenziale in der Substitution

Die derzeit weitverbreitetsten Batterietechnologien sind Lithium-Ionen-Batterien. Zu den besonders kritischen Rohstoffen dieser Batterien zählen Lithium, Nickel, Kobalt, Mangan und Graphit. Verschiedene andere Batterietypen weisen Substitutionspotenziale gegenüber der klassischen Lithium-Ionen-Batterie auf:

- Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt (NMC)-Batteriezellen (~60 % Marktanteil) und Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium (NCA)-Batterien (~8 % Marktanteil): Aufgrund der größeren Reichweite werden NMC- und NCA-Batterien in erster Linie in Fahrzeugen des Premium- und Mittelklasse-Segments verbaut.
- Lithium-Eisenphosphat (LFP)-Batterien (~30 % Marktanteil): LFP-Batterien konnten ihren Marktanteil in den letzten Jahren steigern. Sie werden vor allem in Kleinfahrzeugen verbaut und zeichnen sich im Vergleich zu den anderen Batterietypen durch geringere Reichweite und dafür höhere Langlebigkeit und Sicherheit aus. Sie sind außerdem günstiger in der Herstellung und enthalten keinen Anteil des besonders kritischen Rohstoffs Kobalt.
- Neben LFP-Batterien zeichnet sich mit den ggf. marktnahen Natrium-Ionen-Batterien (signifikante Menge frühestens in fünf Jahren am Markt) ein weiterer Batterietyp mit Potenzial zur Substitution kritischer Rohstoffe ab. Natrium-Ionen-Batterien kommen ohne Lithium aus und werden in naher Zukunft vor allem in zwei- und dreirädrigen Fahrzeugen sowie in kleinen Automobilen erwartet (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung - ISI, 2023).

Darüber hinaus gibt es einige weitere Batterietypen, die potenziell auch zu einer Substitution kritischer Rohstoffe in der automobilen Lieferkette beitragen können, jedoch noch keine kurzfristig absehbare Marktreife aufweisen. Dazu gehören Feststoffbatterien, Magnesium-Ionen-Batterien und weitere Zellchemien, die sich derzeit alle noch im Forschungsstadium befinden.

Die Nutzung der genannten Batteriezellen unterscheidet sich von Anwendungsfall zu Anwendungsfall. Daher kann keine dieser genannten Zelltypen die bestehenden Zelltechnologien für alle Anwendungsfälle ersetzen. Gleichzeitig zeigen die verschiedenen Ansätze bei der Entwicklung von Batterien, wie wichtig Technologieoffenheit ist.

## 1.2 Innovationspotenziale im Recycling

Auch wenn die Unternehmen heute schon viele Weiterbildungsmaßnahmen anbieten, wird es für sie und ihre Beschäftigten in Zukunft noch wichtiger werden, sich rechtzeitig damit auseinanderzusetzen, welche Qualifikationen in der sich verändernden Branche benötigt werden. Aspekte wie eine strategische Planung der Qualifizierungsbedarfe seitens der Unternehmen sind ebenso erfolgskritisch wie die Schaffung der Strukturen für passende Weiterbildungsangebote und -formate.

Recyclingsysteme von Altbatterien bieten langfristig erhebliches Potenzial zur Verringerung des Bedarfs kritischer Rohstoffe in automobilen Wertschöpfungsketten. Die klassischen Recyclingprozesse, die bereits in Anwendung sind, weisen nach wie vor hohes Innovationspotenzial auf. Großes Innovationspotenzial zeichnet sich jedoch auch beim noch nicht marktreifen Verfahren des „Direkten Recyclings“ ab: Bei direktem Recycling kommen in erster Linie physikalische Trennungsmethoden zum Einsatz, wenn auch bei einigen Komponenten weiterhin chemische Wiederaufbereitungsverfahren notwendig sind. Außer den Separatoren können nahezu alle Batteriekomponenten zurückgewonnen werden und direkt wieder in neuen Batterien verwendet werden. Anders als im pyrometallurgischen Verfahren kann so vor allem Lithium in höchstmöglichem Maß recycelt werden, doch auch für Kobalt, Nickel und Mangan ist eine beinahe verlustfreie Rückgewinnung denkbar. Direktes Recycling ist vor allem dann geboten, wenn die jeweilige Batterietechnologie ausgereift und keine signifikante Steigerung der spezifischen Speicherkapazität des jeweiligen

Materials durch neue Synthese mehr möglich ist. Momentan ist direktes Recycling von alten Aktivmaterialien (insbesondere bei hohem Kobalt-Anteil) noch wenig sinnvoll, da mit diesem kritischen Rohstoff in Batterien einer neuen Generation deutlich mehr Speicherleistung erzielt werden kann.

Ein Nachteil des direkten Recyclings ist die Anfälligkeit für Verunreinigungen und die aufwendige Vorsortierung. Recyclinganlagen des direkten Recyclings sind auf eine artgenaue Zulieferung von Batterien angewiesen oder müssen viele verschiedene Verarbeitungsmethoden in einer Anlage vereinen. Das erschwert die Automatisierung und Skalierung. Durch den digitalen Produktpass könnte zumindest die Vorsortierung der verschiedenen Batterietypen erleichtert werden. Insgesamt sorgen die Vorteile des direkten Recyclings für eine potenziell hohe Wirtschaftlichkeit, geringen Energieeinsatz sowie potenziell höhere Lithiumrückgewinnung, gerade bei ausgereiften Batterietechnologien und in Kombination mit klassischen Recyclingverfahren.

### 1.3 Innovationspotenziale für heimischen Rohstoffabbau

Der European Critical Raw Materials Act sieht zunächst bis 2030 vor, dass 10 % des jährlichen Verbrauchs durch in der EU gewonnene Rohstoffe, 40 % durch in der EU verarbeitete Rohstoffe und 25 % durch Recycling gedeckt werden sollen. Derzeit findet Metallerzbergbau in Europa nur in Einzelfällen statt.

Der Abbau von kritischen Rohstoffen in Europa findet derzeit vor allem aus Gründen der mangelnden preislichen Konkurrenzfähigkeit in Drittländern statt. Auch kommunalpolitischer Widerstand ist ein Problem für europäische Abbauprojekte. Die niedrighschwellige Einspruchsmöglichkeit im Umweltgenehmigungsrecht führt selbst bei Projekten mit hoher Kritikalität für das Wirtschaftssystem zu Verzögerung oder gar Verhinderung. Dies verschärft das Problem der fehlenden Finanzierung, das aufgrund der industriebedingten Größe der Projekte mit langen Laufzeiten, hoher Kapitalintensität und relativ hohem Ertragsrisiko ohnehin besteht.

Potenzial zur Innovation des europäischen Rohstoffabbaus besteht in verschiedenen Bereichen:

- Die Digitalisierung und Automatisierung des Bergbaus („Smart Mining“) kann dazu beitragen, die Rohstoffausbeute bei gleichzeitig verringerten Umweltauswirkungen zu verbessern. Dies erhöht nicht nur die Rentabilität von Rohstoffabbauprojekten, sondern kann auch zur gesellschaftlichen Akzeptanz des heimischen Bergbaus beitragen.
- Durch „In Situ-Recovery“ wurde zudem ein Verfahren entwickelt, mit dem die hydrometallurgische Verarbeitung von rohstoffhaltigen Gesteinen im Untergrund passieren kann, was ebenfalls Umweltauswirkungen verringern kann und zusätzlich zur Rohstoffausbeute beiträgt.
- Zudem zeichnen sich verschiedene biotechnologische Verfahren ab, die die hydrometallurgische Behandlung rohstoffhaltiger Vorkommen ergänzen und ihre Effizienz erhöhen können.
- Eine Maßnahme zur Ergänzung europäischer Primärbergbauprojekte bietet die Wiederaufbereitung von Aufbereitungsrückständen (Tailings).
- Alternative Rohstoffquellen könnten zudem in Tiefengewässern liegen, wie das Beispiel des Oberrheingrabens zeigt.

## 1.4 Innovationspotenzial durch Fahrzeugdesign und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Bereichen

Die Innovationspotenziale in den verschiedenen Bereichen der automobilen Wertschöpfungskette und des Mobilitätssystems sollten nicht isoliert voneinander betrachtet werden. Ihre größte Wirkung entfalten sie, wenn Fahrzeugdesign sowie andere Aspekte aufeinander abgestimmt werden.

Effizienzsteigerungen durch den **Leichtbau** von Fahrzeugen können den Bedarf an kritischen Rohstoffen verringern, da bei gleicher Laufleistung kleinere Batterien eines Batterietyps ermöglicht werden. Allerdings müssen diese Designanpassungen mit Blick auf die resultierende Verschiebung des Rohstoffbedarfs betrachtet werden. Auch Aluminium und Kupfer, dessen Nachfrage durch den Leichtbau erhöht werden kann, sind als kritische Rohstoffe deklariert.

Großes und langfristiges Potenzial zur Einsparung kritischer Rohstoffe entfaltet das **Fahrzeugdesign in Verbindung zum Recycling**. Die Recycelbarkeit eines Fahrzeugs bestimmt sich im Designprozess. Die Grundprinzipien des „Design-for-Recycling“ zu beachten kann hier bedeuten: die Materialvielfalt zu reduzieren und kreislaufkritische Materialien (Störstoffe wie Kupfer in Aluminium) zu vermeiden oder in leicht demontierbare Komponenten zu verbauen, weniger und leicht lösbare oder zerstörbare Verbindungstechnik oder die Vermeidung von Materialien, die Maschinen im Verwertungsprozess beschädigen können. Ferner erleichtert die Transparenz der Materialzusammensetzung durch die digitale Erfassung im Rahmen des Batteriepasses auch die Verwertung und Materialrückführung (etwa über Catena X).

Der Ausbau der **(Schnell-)Ladeinfrastruktur** kann die marktbestimmende „Reichweitenangst“ und damit die Nachfrage nach reichweitestarken, rohstoffintensiven Batterien verringern. Die Ladeinfrastruktur muss daher mit dem Ladebedarf Schritt halten. Inwieweit modulare Batteriesysteme den Rohstoffbedarf verringern, hängt von der technologischen Entwicklung ab, deshalb gilt es, grundsätzlich technologieoffen zu sein. Eine umfassende Kosten-Nutzen-Abwägung wird erst im Zeitverlauf möglich sein.

Zusätzlich ist auch eine für den Verbraucher attraktivere **Verknüpfung mit anderen Mobilitätsträgern** (ÖPNV etc.) sinnvoll, um die Nachfrage nach Elektroautos mit hoher Reichweite zu verringern.

Innovationen beim **europäischen Rohstoffabbau** allein können nicht zur Verringerung internationaler Abhängigkeiten beitragen. Dafür bedarf es zusätzlich auch der Etablierung einer heimischen Industrie zur Aufbereitung und Weiterverarbeitung der gewonnenen Rohstoffe. Von einer heimischen Weiterverarbeitungsindustrie profitiert auch die Recyclingindustrie. Die Nutzung von Synergien bietet langfristig großes Potenzial zur Verbesserung der Verfügbarkeit sekundärer Rohstoffe.

## 2 Zielbild

Ziel der nachfolgenden Handlungsempfehlungen ist es, die resiliente Versorgung der deutschen Automobilwirtschaft mit kritischen Rohstoffen und Zwischenprodukten durch die Nutzung bestehender Innovationspotenziale zu sichern. Dadurch soll der Industrie- und Technologiestandort Deutschland erhalten und nach Möglichkeit ausgebaut werden. Gleichzeitig soll durch die Innovationen eine klima- und umweltfreundlichere Produktion befördert werden.

## 3 Handlungsempfehlungen

Im Folgenden werden ausgewählte, konkrete Maßnahmen empfohlen, die Technologie-, Prozess-, Organisations- und Geschäftsmodell-Innovationen für eine resilientere Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten fördern.

### 3.1 Technologien/(Anwendungs-)Forschung

Die Forschung zu Recycling-Technologien, die derzeit nur im Labor- und Pilotmaßstab verfügbar sind, sollte gefördert werden. Von den Grundlagen bis hin zu ihrer kommerziellen Reife. Ziel ist es, diese Technologien in Deutschland und Europa wettbewerbsfähig großindustriell zur Anwendbarkeit zu bringen. Dabei handelt es sich insbesondere um Prozesse, für welche bisher keine kommerziellen Technologien am Markt etabliert sind, wie zum Beispiel:

- Das automatisierte Verfahren zur Demontage von Batteriemodulen (Dismanting, Disassembly von Modulen), Delaminierung von Stacks.
- Physikalische Sortierung von Anoden- und Kathodenmaterial.
- Das Recycling von Graphit.
- Das Recycling von Eisen und Phosphor aus Lithiumeisenphosphat-Batterien (LFP).
- Die Optimierung von Schwarzmasse-Raffinerieprozessen.
- Die Verknüpfung von Recycling- und Batteriematerialherstellungsprozessen in der Wertschöpfungskette und die damit einhergehende Einsparung von Prozessschritten.
- Die Erarbeitung von kostengünstiger Standardanalytik zur Qualitätssicherung und zur Bestimmung von Wertprodukten im Abfallstrom bzw. prozessrelevante Unreinheiten im Recyclingprodukt (z.B. Lithium und Fluor).

Zudem würde die Vereinfachung des Abfallrechts in Bezug auf die Verwendung von Schwarzmasse in Forschungslaboren die Durchführung von derartigen Forschungsarbeiten und die industrielle Verfahrensentwicklung beschleunigen.

Im Koalitionsvertrag hat die Bundesregierung das Ziel formuliert, ein Reallabor-Gesetz zu schaffen, das neue Freiräume zur Erprobung von Innovationen ermöglicht. Reallabore sind ein wirksames Instrument, um Innovationen in einem gelockerten Rechtsrahmen zu ermöglichen. Mit Hilfe von Reallaboren kann auch die stärkere Vernetzung von Wirtschaft und Wissenschaft unterstützt werden, indem die beteiligten Partner neue Technologien, Anwendungsfelder und Geschäftsideen sowie regulatorische Instrumente ergebnisoffen testen können. Reallabore sollten bürokratiearm ausgestaltet sein, zügig genehmigt werden, akteursoffen sein und dabei insbesondere diejenigen einbinden, die später die Innovation nutzen oder anbieten sollen sowie generell transparent und niedrighschwellig gestalten werden. Zudem ist es wichtig, dass sie technologieoffen arbeiten.

Reallabore könnten insbesondere in den folgenden Feldern innovationsfördernd eingesetzt werden:

- Reallabore im Bereich Recycling – bestehende Infrastrukturen an Universitäten und Forschungseinrichtungen ausbauen (bspw. Vereinfachung des Abfallrechts in Bezug auf die Schwarzmasse in der Forschungsphase).

- Reallabore zum Repair von Batteriesystemen und erneutem Einsatz im Zweitfahrzeug.
- Reallabore zur Nutzung von alten Bergbauhalden für die Gewinnung kritischer Metalle. Einige Unternehmen haben hier bereits Pilotprojekte gestartet.

### 3.2 Technologien/(Grundlagen-)Forschung

In Bezug auf die Zielstellung, mit Innovationen die Resilienz der Versorgung mit kritischen Rohstoffen zu fördern, könnte die bestehende Forschungsförderung wie folgt optimiert werden:

- Die Forschungsförderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), bspw. Cluster goes industry und B@TS, und Industrieförderung (zumindest größere Unternehmen) direkt durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Bereich Batterie ist vielfältig. In den Programmen fehlt jedoch ein ganzheitlicher Blick auf Gesamtkreisläufe.
- Es fehlt eine stärkere Förderung eines Gesamt-Ökosystems im Materialbereich, insbesondere auch bei Sekundärmaterialien, d.h. fokussierte Förderung von Rohmaterialgewinnung, -aufbereitung bis Synthese von Funktionsmaterialien und damit der Stärkung der Resilienz.
- Die von der Bundesregierung geförderten Kompetenzcluster im Bereich geschlossene Materialkreisläufe (d.h. auch direktes Recycling, Resynthese, Rekonditionierung) sollten weiterentwickelt werden.
- Das BMBF sollte ein eigenes Kompetenzcluster zur Materialgewinnung, -aufbereitung und Weiterverarbeitung einrichten oder bestehende Cluster um dieses Thema erweitern.
- Das Energieforschungsrahmenprogramm des BMWK sollte explizit das Thema Material-Resilienz für Batterien, Brennstoffzellen etc. mit adressieren, parallel wären Bekanntmachungen in dieser Richtung wertvoll.
- Sowohl klassische Recyclingverfahren als auch direktes Recycling sollten weiter intensiv erforscht werden (in Kompetenzcluster etc.).
- Eine kostengünstige Standardanalytik zur Qualitätssicherung, insbesondere für Lithium, sollte erforscht werden.

### 3.3 Transfer & Kooperation

Die folgenden, neuen Formen der Kooperation und des Transfers (zwischen KMU, Start-Ups, Konzernen) werden empfohlen, um die Innovationspotenziale zu heben.

- Piloteinrichtungen sollten gemeinsam genutzt werden können. Derzeit gibt es erhebliche Hemmnisse durch länderspezifische Hochschulgesetze, bzw. Vorbehalte bei Unternehmen. Diese Hürden müssen abgebaut werden.
- Die Erfahrungen in den vom BMWK geförderten Transfer-X und TraWeBa, insbesondere auch im Batteriebereich, sollten reflektiert und ausgewertet werden.

### 3.4 Verfahren, Organisation & Rahmenbedingungen

- Die Demontierbarkeit von Batteriezellen für Reparatur und finales Recycling sollte incentiviert werden. Bestehende Verfahren sollten nicht verboten werden, stattdessen könnten negative ökologische Folgen

der Primärrohstoffproduktion und -verarbeitung bei Sicherstellung eines angemessenen Grenzausgleichs bepreist werden.

- Nutzung von Batteriesystemen in einem Zweitfahrzeug sollte ermöglicht werden.
- Die Nutzung stehender Elektrofahrzeuge als Speicher für Haushalte (bidirektionales Laden) sollte ermöglicht werden, indem die bestehenden Hürden von den entsprechenden Stakeholdern abgebaut werden (technische Kompatibilität von Bordnetzen, Hausanschlüssen und Wallboxen; adäquate Mess- und Abrechnungssysteme mit Stromversorgern, Lastmanagement im Netz, Garantie- und Haftungsfragen, fehlendes Geschäftsmodell).
- Ergänzend zum Primärrohstoffabbau sollte die Wiederaufbereitung von Aufbereitungsrückständen (Tailings) unterstützt bzw. ermöglicht werden.

## Über den Expertenkreis

*Der Expertenkreis Transformation der Automobilwirtschaft (ETA) ist ein unabhängiges Beratungsgremium des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Der Expertenkreis entwickelt ziel- und adressatenorientierte Handlungsempfehlungen an die Politik, die Wirtschaft und die Gesellschaft, mit deren Hilfe der langfristige Strukturwandel der Branche erfolgreich gestaltet werden kann. Übergeordnetes Ziel ist es, Klimaneutralität zu erreichen sowie Wertschöpfung, Arbeits- und Ausbildungsplätze am Automobilstandort Deutschland zu sichern.*

*Der ETA besteht aus 13 Personen aus Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft, die von Bundesminister Dr. Robert Habeck für die 20. Legislaturperiode berufen wurden. Über flexible und agil operierende Arbeitsformate sind weitere Sachverständige sowie relevante Institutionen und Stakeholder in die Arbeit des ETA eingebunden. Die Mitglieder erhalten keine Vergütung oder Aufwandsentschädigung für ihre Mitwirkung im ETA. Der Expertenkreis wird durch eine vom BMWK beauftragte Prozessbegleitung und wissenschaftliche Begleitung unterstützt. Der ETA hat mit dem Expertenbeirat Klimaschutz in der Mobilität (EKM) ein Schwestergremium beim Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV). Beide Gremien sind in die Strategieplattform Transformation der Automobil- und Mobilitätswirtschaft (STAM) der Bundesregierung eingebunden.*

*Für die Inhalte ist der ETA verantwortlich. Er entwickelt Stellungnahmen, Positionspapiere und Berichte teilweise in seinen Arbeitsgruppen, berät und beschließt sie anschließend im Plenum und veröffentlicht sie dann in eigener Verantwortung.*

### IMPRESSUM

VERFASSER: Expertenkreis Transformation der Automobilwirtschaft (ETA), Reinhardtstraße 58, 10117 Berlin | <https://expertenkreis-automobilwirtschaft.de/>

HERAUSGEBER: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)