

Nachhaltigkeit der Batteriezellfertigung in Europa

Wie nachhaltig sind Batterien und Elektromobilität wirklich?

Publikation der wissenschaftlichen Begleitung zur Fördermaßnahme Batteriezellfertigung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie



in Kooperation mit

Herausgeber

VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
Steinplatz 1
10623 Berlin

Autor:innen

Mischa Bechberger
Frederik Vorholt
Aiko Bünting
Nikolas Oehl-Schalla
Linda Arnold-Triangeli
Vera Beermann
Pinar Bilge
Marcia Giacomini
Julian Marscheider
Steven Patrick Neupert
Roman Korzynietz
Sezer Solmaz
Franz Dietrich
Julia Kowal
Stefan Wolf

Redaktion

Heike Jürgens
Mira Maschke

Gestaltung

VDI/VDE-IT, Anne-Sophie Piehl

Berlin, Juni 2021

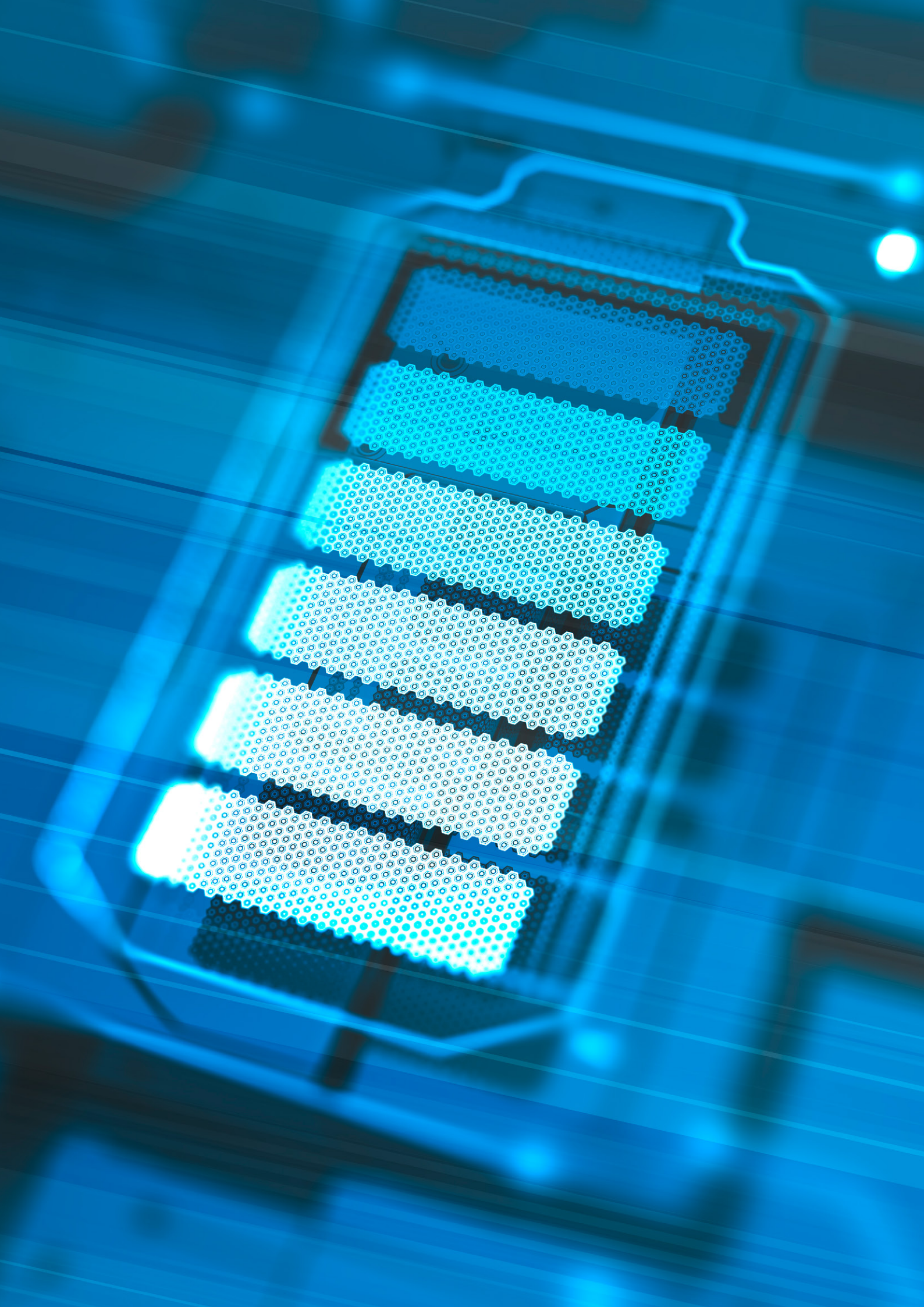
Bildnachweise

Titelseite: Maksym Yemelyanov/AdobeStock
S. 2: MF3d/iStock
S. 43: Naturestock/AdobeStock

in Kooperation mit

INHALT

Executive Summary	3
1 Nachhaltigkeit der Batteriezellfertigung	4
1.1 Die Notwendigkeit einer nachhaltigen Batteriezellfertigung	4
1.2 Der Begriff Nachhaltigkeit im Kontext der Batteriezellfertigung	6
1.3 Nachhaltigkeit im Entwurf der neuen EU-Batterieverordnung	8
2 Thesen zur nachhaltigen Batteriezellfertigung	10
2.1 Klimaschutz	10
2.2 Industriepolitik	18
2.3 Kreislaufwirtschaft	28
2.4 Rohstoff-Governance	34
2.5 Wirtschaftlichkeit	41
2.6 Beschäftigung	47
3 Fazit	52
Literaturverzeichnis	54
4 Anhang – Rohstoffsteckbriefe	67
4.1 Kobalt	67
4.2 Lithium	68
4.3 Graphit	70
Abbildungsverzeichnis	73
Abkürzungsverzeichnis	74
Glossar	76



EXECUTIVE SUMMARY

Die Batterietechnologie wird zu einem wesentlichen Baustein nachhaltiger Mobilität und Energieversorgung. Beim Aufbau des neuen europäischen Industriezweigs Batteriezellfertigung müssen dazu alle Facetten der Nachhaltigkeit Berücksichtigung finden. Mit dem Ziel der Herstellung „grüner“ Batterien muss ein Interessenausgleich zwischen den folgenden sechs Nachhaltigkeitsthemen Klimaschutz, Industriepolitik, Kreislaufwirtschaft, Rohstoff-Governance, Wirtschaftlichkeit und Beschäftigung erreicht werden. Die vorliegende Studie liefert eine auf gesicherten Erkenntnissen basierende Grundlage und bereitet den Weg für eine faktenbasierte Debatte zur Implementierung von Nachhaltigkeitskriterien beim Aufbau des Batterie-Ökosystems. Die vorgenommene Analyse führt zu den folgenden Kernaussagen.

Klimaschutz: Batteriespeicher sind eine entscheidende Schlüsseltechnologie für die nachhaltige Transformation der Automobilindustrie sowie der Energieversorgung. Der Ausbau der erneuerbaren Energien führt unmittelbar zu einer Minderung der Treibhausgasemissionen in der Produktion und der Nutzung von Batterien. Zu dieser Entwicklung tragen zudem innovative Technologien als auch international bindende Abkommen und deren regulatorische Umsetzung bei.

Industriepolitik: Die strategische Förderung nachhaltiger Batterieinnovationen versetzt die deutsche und europäische Industrie in die Lage, Wettbewerbsvorteile zu generieren. Zudem werden Anreize zur Kooperation entlang der gesamten Batteriewertschöpfungskette gesetzt, die zur Bündelung vorhandener Stärken führt.

Kreislaufwirtschaft: Die Kreislaufführung von Batterierohstoffen liefert einen wichtigen Beitrag zur Sicherung der Rohstoffversorgung, zur Minderung von Umweltauswirkungen durch Rohstoffgewinnung und zur Minderung von Treibhausgasemissionen bei der Rohstoffaufbereitung. Anreize zur Sammlung und zum Recycling von Altbatterien beschleunigen den Aufbau einer Kreislaufwirtschaft.

Rohstoff-Governance: Die Förderung von Rohstoffen findet häufig in Ländern mit niedrigen Umwelt- und Sozialstandards statt und für eine Rohstoffversorgung müssen neue Lagerstätten erschlossen werden. Die Politik gestaltet die Rahmenbedingungen für eine gesicherte Rohstoffversorgung und zur Einhaltung von Sorgfaltspflichten in der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung. Mit der Entwicklung eines digitalen Produktpasses für Batterien bereitet die Industrie den Weg zur Transparenz entlang der Batterielieferkette. Zeitgleich werden Technologien zur Substitution kritischer Rohstoffe entwickelt.

Wirtschaftlichkeit: Die Kostenparität von batterieelektrischen Fahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ist für erste Anwendungen bereits erreicht. Das gilt insbesondere für die Betrachtung der gesamten Lebenszykluskosten eines Fahrzeugs. Darüber hinaus weisen batterieelektrische Fahrzeuge aufgrund von Skalierungseffekten und technologischen Innovationen im Bereich der Batteriezellfertigung ein hohes Kostensenkungspotenzial auf.

Beschäftigung: Die Automobilindustrie befindet sich in einer Transformationsphase. Aufgrund von Produktivitätsgewinnen und einer veränderten Nachfrage wird es zu einem Rückgang konventioneller Automobilarbeitsplätze kommen, der durch konsequente Investition in Batteriezellfertigung und Elektromobilität zu großen Teilen kompensiert werden kann. Die damit einhergehende Reorganisation der Wertschöpfung wird zu einer Verschiebung der Bedarfe an Arbeitskräften und somit zu einem hohen Qualifizierungsbedarf in der Automobilwirtschaft führen.

1 NACHHALTIGKEIT DER BATTERIEZELLFERTIGUNG

1.1 Die Notwendigkeit einer nachhaltigen Batteriezellfertigung

Der globale Gesamtbedarf an Batterien für elektrische Fahrzeuge, stationäre Speicher und Verbraucherelektronik wird sich laut einer aktuellen Prognose im aktuellen Jahrzehnt nahezu versiebenfachen und auf rund 2.200 Gigawattstunden p. a. im Jahr 2030 ansteigen.¹ Mit rund 80% des Bedarfs im Jahr 2030 ist die Automobilindustrie der größte Treiber. Die sich derzeit vollziehende Transformation der Antriebstechnologie zum Zweck der Treibhausgasemissionsreduktion im Verkehr hat zuletzt deutlich an Dynamik gewonnen. Trotz der pandemiebedingten Einbrüche bei den weltweiten Fahrzeugneuzulassungen hat das Verkaufsvolumen elektrischer Fahrzeuge 2020 in Europa derart stark zugenommen, dass deren Marktanteil bei Pkw auf 10,5% anstieg und sogar erstmals die Anzahl an Neuzulassungen in China übertraf.²

Die zur gebotenen Dekarbonisierung des Verkehrssektors notwendige Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen bedingt sowohl eine tiefgreifende Transformation der Automobilwirtschaft als auch einen erheblichen Ausbau der Batteriezellfertigung. Zur Deckung des in den kommenden Jahren immens steigenden Zellbedarfs werden derzeit Produktionsstätten global, aber vor allem in Europa massiv auf- und ausgebaut. Infolge dessen wird die globale Produktionskapazität von aktuell etwa 320 Gigawattstunden pro Jahr (GWh/a) auf voraussichtlich bis zu 3.600 GWh/a bis 2030 zunehmen.³ Damit die Emissionsreduktion im Verkehrssektor durch die Transformation der Antriebstechnologie größtmögliche Wirkung entfalten kann, ist eine nachhaltige Batterieproduktion elementar. Batterien verantwortungsvoll und nachhaltig zu produzieren, bedeutet, in der gesamten Wertschöpfungskette Emissionen von Treibhausgasen und umweltschädlichen Substanzen zu minimieren, Menschenrechtsverletzungen zu beseitigen, sichere Arbeitsbedingungen zu gewährleisten sowie Wiederverwendung und Recycling zu steigern.⁴

Der Aufbau einer zirkulären, verantwortungsvollen und gerechten, d.h. nachhaltigen Batteriewertschöpfungskette wird jedoch nicht ohne eine aktive Abkehr vom derzeitigen Entwicklungspfad erreicht werden, sondern erfordert koordinierte, sofortige Maßnahmen von Unternehmen, Investoren und politischen Entscheidungsträger:innen – in Absprache mit allen Interessengruppen.⁵ Von großer Bedeutung sind hierbei die Verwendung verantwortungsvoll beschaffter Materialien, ein begrenzter Einsatz gefährlicher Stoffe, ein Mindestgehalt an recyceltem Material und ein minimaler CO₂-Fußabdruck sowie hohe Leistung, lange Haltbarkeit und eine spezifische Kennzeichnung der Batterien.⁶

Der stark zunehmende Batteriebedarf wird zu einem entsprechenden Anstieg der Nachfrage nach Rohstoffen führen, insbesondere nach Kobalt, Lithium, Nickel und Mangan, was erhebliche ökologische, soziale und ökonomische Auswirkungen mit sich bringt (s. Kapitel 2.2). Für in Elektrofahrzeugen verwendete Traktionsbatterien wird in der EU im Jahr 2030 voraussichtlich 18 Mal und 2050 sogar 50 Mal mehr Lithium benötigt werden als noch im Jahr 2018. In Bezug auf Kobalt wird der Bedarf bis 2030 voraussichtlich fünfmal und bis 2050 15 Mal so hoch sein wie bisher.⁷ Die zunehmende Verwendung von Batterien wird auch zu einem Anstieg der Abfallmengen (prozessbedingt sowie durch Batterien, die das Lebensende erreicht haben) führen. Die Zahl der recycelbaren Lithium-Ionen-Batterien wird zwischen 2020 und 2040 voraussichtlich um das 700-fache steigen.⁸

Die Herstellung von Traktionsbatterien ist energieintensiv. Aufgrund dessen wird bei der Bereitstellung der für die Produktion notwendigen thermischen und elektrischen Energie in Abhängigkeit der eingesetzten Kraftwerke und Energieträger Treibhausgas (THG) emittiert. Damit die Transformation der Antriebstechnologie zu dem Ziel einer Treibhausgasreduktion im Verkehr führt, ist die Minimierung des CO₂-Fußabdrucks der Zellproduktion zwingend notwendig. Je emissi-

1 Harrison, 2021

2 Transport & Environment, 2021a

3 VDI/VDE-IT, tbp

4 World Economic Forum, 2019

5 World Economic Forum, 2019

6 Europäische Kommission, 2020a

7 Europäische Kommission, 2020b

8 Europäische Kommission, 2020c

onsärmer die Energie bereitgestellt wird, desto größer ist der Dekarbonisierungseffekt der Elektromobilität.

Die dringende Notwendigkeit weitreichender und konsequenter Maßnahmen gegen die nicht auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Nutzung natürlicher Ressourcen und den Klimawandel ist nicht nur weithin anerkannt, sondern ist auch Gegenstand vieler bestehender oder in Erstellung befindlicher Abkommen und Regularien. Mit Inkrafttreten der aktuell als Entwurf vorliegenden Batterieverordnung der EU werden sich tiefgreifende Konsequenzen für die Herstellung und das Inverkehrbringen von Batterien ergeben. In dem Verordnungsentwurf werden insbesondere die Nachhaltigkeit von Batterien über ihren gesamten Lebenszyklus, die Resilienz der Versorgungskette in der EU und die ökologischen und sozialen Auswirkungen über die gesamte Lebensdauer der Batterien adressiert. Aufgrund der hohen Relevanz erfolgt eine ausführliche Betrachtung der vorgeschlagenen Batterieverordnung in Kapitel 1.3.

Zur Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2°C und möglichst auf 1,5°C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau (Hauptziel des Pariser Abkommens) sowie zur Erreichung des im EU Green Deal formulierten Ziels, den Treibhausgasausstoß bis 2030 um mindestens 55 % gegenüber dem Niveau von 1990 zu mindern, sind deutliche Emissionsreduktionen in allen Sektoren essenziell. Der Verkehrssektor ist im Hinblick auf die angestrebten Klimaschutzbemühungen jedoch von besonderer Bedeutung. Im Jahr 2018 war der Verkehr mit 28 % (inkl. Flug- und Schiffsverkehr, bzw. 21 % ohne die beiden Subsektoren) für den größten Teil der Gesamtemissionen der EU verantwortlich.⁹ Zudem ist der Verkehr der einzige Sektor, in dem die Emissionen seit 1990 zugenommen haben – um gut 23 % im Jahr 2018 und um fast 24 % nach vorläufigen Daten für 2019.¹⁰

Aktuelle Studien kommen zu dem Ergebnis, dass das noch verfügbare Emissionsbudget des EU-Verkehrssektors bei gleichbleibenden Emissionen hinsichtlich der bis 2050 an-

gestrebten Klimaneutralität bereits in 11 bis 13 Jahren aufgebraucht wäre und die Emissionen des Verkehrssektors für ein Einhalten des 1,5°C-Ziels bereits im Zeitraum 2042-45 auf Null sinken müssten.¹¹

Zur Erreichung des EU-Klimaziels müsste in Deutschland im Zuge der so genannten Lastenverteilung (burden sharing) das nationale Klimaziel auf bis zu 70 % Treibhausgasreduzierung bis 2030 gegenüber 1990 angehoben und damit die Anstrengungen zur Emissionsminderung in allen Sektoren weiter verstärkt werden. Infolge des in Teilen als verfassungswidrig beurteilten¹² deutschen Klimaschutzgesetzes vom 12. Dezember 2019 will die Bundesregierung die nationalen Klimaschutzvorgaben verschärfen. Bis 2030 soll demnach eine Treibhausgasreduzierung von 65 % gegenüber dem Emissionsniveau von 1990 erzielt und die Treibhausgasneutralität bereits 2045 erreicht werden. Der aktuelle Gesetzesentwurf sieht vor, dass die Energiewirtschaft mit einer im Vergleich zum bisherigen Klimaschutzgesetz zusätzlichen Emissionsminderung um fast 40 % den größten Beitrag leistet, jedoch ist auch dem Verkehrssektor eine um mehr als 10 % erhöhte Emissionsreduktion bis 2030 zugeordnet.¹³

Zur Erreichung der Klimaneutralität des Verkehrssektors in Deutschland im Jahr 2045 kann die Elektromobilität den zentralen Beitrag leisten, wie eine aktuelle Studie¹⁴ prognostiziert: Durch einen Anstieg des Bestandes von E-Pkw (inkl. Plug-In Hybride) auf 14 Millionen Fahrzeuge, das Erbringen fast eines Drittels der Fahrleistung im Straßengüterverkehr mittels elektrisch angetriebener Lkw (batterieelektrisch, Oberleitungen und Brennstoffzelle) sowie eines verstärkten Schienengüterverkehrs und eines deutlichen Anstiegs von ÖPNV, Rad- und Fußverkehr am Modal Split, ließen sich die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors demnach von 162 Mio. Tonnen im Jahr 2018 auf 89 Mio. Tonnen, d. h. um rund 45 % im Jahr 2030 reduzieren. Durch das fast vollständige Ersetzen aller Bestandsfahrzeuge mit Verbrennungsmotor durch E-Pkw, inkl. einer ausbleibenden Neuzulassung von Pkw mit Verbrennungsmotor ab 2032 und einer fast kompletten Um-

9 Transport & Environment, 2020a

10 European Environment Agency, 2020a

11 Plötz et al., 2021

12 BVerfG, 2021

13 Die Bundesregierung, 2021a

14 Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, 2021

stellung auf elektrisch angetriebene Lkw, Busse und Bahnen, sowie eines Einsatzes ausschließlich strombasierter Kraftstoffe im Luft- und Seeverkehr v. a. nach 2035, könnte 2045 ein treibhausgasneutraler Verkehrssektor in Deutschland erreicht werden.¹⁵

Um die notwendige Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen zu beschleunigen, müssen mehr Investitionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette sowie in die Anwendungsinfrastruktur (z. B. Ladeinfrastruktur) getätigt werden. Zudem müssen die Batterien durch niedrigere Produktionskosten, höhere Auslastung und verbesserte Geschäftsmodelle für die Endverbraucher:innen erschwinglicher werden.¹⁶ Diese Herausforderungen sind sowohl von der Politik als auch der Wirtschaft erkannt und angenommen worden. Auf politischer Ebene hat die European Battery Alliance (EBA) das Ziel ausgegeben, dass bis 2030 ein Drittel des Weltmarktbedarfs an Batterien für Elektrofahrzeuge in Europa gefertigt, verkauft und exportiert werden. Die EBA schätzt das Marktpotenzial für in Europa produzierte automobiler Batterien schon bis Mitte der 2020er Jahre auf bis zu 250 Milliarden Euro.¹⁷ Motiviert durch die politische Unterstützung in Form von staatlicher Förderung (vgl. Kapitel 2.2.2) und entsprechend optimistischen Prognosen der Marktnachfrage nach Elektrofahrzeugen (vgl. Kapitel 2.1) befinden sich in Europa derzeit zahlreiche sogenannte Gigafactories diverser in- als auch ausländischer Batteriehersteller im Aufbau oder zumindest in Planung, die zusammengenommen eine jährliche Produktionskapazität von bis zu 960 GWh im Jahr 2030 erreichen.¹⁸ Aus dieser Dynamik ergeben sich sowohl ein Bedarf zur Regulierung der Batteriezellfertigung als auch die Möglichkeit, entsprechend tiefgreifende Maßnahmen mit dem Ziel der Steigerung der Batterienachhaltigkeit bereits vor der Fertigstellung vieler Produktionsstätten umzusetzen.

Diese Publikation gibt im Folgenden eine Übersicht über den Status quo und die Perspektiven der unterschiedlichen Aspekte einer nachhaltigen Batteriezellfertigung in Europa. Thesenbasiert werden die relevanten Nachhaltigkeitsthemen Klimaschutz (2.1), Industriepolitik (2.2), Kreislaufwirt-

schaft (2.3), Rohstoff-Governance (2.4), Wirtschaftlichkeit (2.5) und Beschäftigung (2.6) erörtert. Neben der gegenwärtigen Debatte werden insbesondere aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse diskutiert und kontrastiert.

1.2 Der Begriff Nachhaltigkeit im Kontext der Batteriezellfertigung

Die Vielschichtigkeit des Begriffs Nachhaltigkeit macht eine kontextbezogene Definition notwendig. Das dieser Studie zugrundeliegende Verständnis des Nachhaltigkeitsbegriffs orientiert sich grundsätzlich und kontextbezogen an der Definition nachhaltiger Batterien der Europäischen Kommission. Diese werden **„[...] mit möglichst geringen Umweltauswirkungen und unter Verwendung von Materialien hergestellt, die unter vollständiger Einhaltung sozialer und ökologischer Standards gewonnen wurden. Sie sind langlebig und sicher und können repariert, wiederverwendet und umgenutzt werden“**.¹⁹

Ausführungen zur Nachhaltigkeit erfolgen in dieser Studie für folgende drei Ebenen:

- **Ökologische Nachhaltigkeit:** Per Definition handelt es sich bei der ökologischen Nachhaltigkeit um ein Prinzip, nach dem nicht mehr verbraucht werden darf, als nachwachsen, sich regenerieren und künftig wieder bereitgestellt werden kann.
- **Ökonomische Nachhaltigkeit:** Das Ziel der ökonomischen Nachhaltigkeit ist es, ein Wirtschaftssystem zu formen, das auf Dauer funktionstüchtig ist. Ein hoher Beschäftigungsgrad, Preisstabilität und außenwirtschaftliches Gleichgewicht gelten als die drei Grundziele, die für dauerhafte Aufrechterhaltung dieses System erreicht werden müssen.
- **Soziale Nachhaltigkeit:** Die soziale Nachhaltigkeit beschreibt die bewusste Organisation von sozialen und kulturellen Systemen, insbesondere im Hinblick auf menschliche Würde sowie das Arbeits- und Menschenrecht. Innerhalb von Unternehmen kann sich dies bspw.

¹⁵ Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut, 2021

¹⁶ World Economic Forum, 2019

¹⁷ BMWi, 2021a

¹⁸ VDI/VDE-IT, ttp

¹⁹ Europäische Kommission, 2020b

<p>3 GESUNDHEIT UND WOHLERGEHEN</p> 	<p>Bis 2030 die Zahl der Todesfälle und Erkrankungen aufgrund gefährlicher Chemikalien und der Verschmutzung und Verunreinigung von Luft, Wasser und Boden erheblich verringern.</p>	<p>9 INDUSTRIE, INNOVATION UND INFRASTRUKTUR</p> 	<p>Bis 2030 die Infrastruktur modernisieren und die Industrien nachrüsten, um sie nachhaltig zu machen, mit effizienterem Ressourceneinsatz und unter vermehrter Nutzung sauberer und umweltverträglicher Technologien und Industrieprozesse, wobei alle Länder Maßnahmen entsprechend ihren jeweiligen Kapazitäten ergreifen.</p>
<p>6 SAUBERES WASSER UND SANITÄR-EINRICHTUNGEN</p> 	<p>Bis 2030 die Effizienz der Wassernutzung in allen Sektoren wesentlich steigern und eine nachhaltige Entnahme und Bereitstellung von Süßwasser gewährleisten, um der Wasserknappheit zu begegnen und die Zahl der unter Wasserknappheit leidenden Menschen erheblich zu verringern.</p> <p>Bis 2030 die Wasserqualität durch Verringerung der Verschmutzung, Beendigung des Einbringens und Minimierung der Freisetzung gefährlicher Chemikalien und Stoffe, Halbierung des Anteils unbehandelten Abwassers und eine beträchtliche Steigerung der Wiederaufbereitung und gefahrlosen Wiederverwendung weltweit verbessern.</p>	<p>Die einheimische Technologieentwicklung, Forschung und Innovation in den Entwicklungsländern unterstützen, einschließlich durch Sicherstellung eines förderlichen politischen Umfelds, unter anderem für industrielle Diversifizierung und Wertschöpfung im Rohstoffbereich.</p>	<p>Die wissenschaftliche Forschung verbessern und die technologischen Kapazitäten der Industriesektoren in allen Ländern und insbesondere in den Entwicklungsländern ausbauen und zu diesem Zweck bis 2030 unter anderem Innovationen fördern und die Anzahl der im Bereich Forschung und Entwicklung tätigen Personen je 1 Million Menschen sowie die öffentlichen und privaten Ausgaben für Forschung und Entwicklung beträchtlich erhöhen.</p>
<p>7 BEZAHLBARE UND SAUBERE ENERGIE</p> 	<p>Zugang zu bezahlbarer, verläSSLicher, nachhaltiger und moderner Energie für alle sichern.</p> <p>Bis 2030 die weltweite Steigerungsrate der Energieeffizienz verdoppeln.</p>	<p>11 NACHHALTIGE STÄDTE UND GEMEINDEN</p> 	<p>Bis 2030 die von den Städten ausgehende Umweltbelastung pro Kopf senken, unter anderem mit besonderer Aufmerksamkeit auf der Luftqualität und der kommunalen und sonstigen Abfallbehandlung.</p>
<p>8 MENSCHENWÜRDIGE ARBEIT UND WIRTSCHAFTSWACHSTUM</p> 	<p>Entwicklungsorientierte Politiken fördern, die produktive Tätigkeiten, die Schaffung menschenwürdiger Arbeitsplätze, Unternehmertum, Kreativität und Innovation unterstützen, und die Formalisierung und das Wachstum von Klein-, Klein- und Mittelunternehmen unter anderem durch den Zugang zu Finanzdienstleistungen begünstigen.</p> <p>Sofortige und wirksame Maßnahmen ergreifen, um Zwangsarbeit abzuschaffen, moderne Sklaverei und Menschenhandel zu beenden und das Verbot und die Beseitigung der schlimmsten Formen der Kinderarbeit, einschließlich der Einziehung und des Einsatzes von Kindersoldaten, sicherstellen und bis 2025 jeder Form von Kinderarbeit ein Ende setzen.</p> <p>Bis 2030 die weltweite Ressourceneffizienz in Konsum und Produktion Schritt für Schritt verbessern und die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Umweltzerstörung anstreben, im Einklang mit dem Zehn-Jahres-Programmrahmen für nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster, wobei die entwickelten Länder die Führung übernehmen.</p> <p>Die Arbeitsrechte schützen und sichere Arbeitsumgebungen für alle Arbeitnehmer, einschließlich der Wanderarbeitnehmer, insbesondere der Wanderarbeitnehmerinnen, und der Menschen in prekären Beschäftigungsverhältnissen, fördern.</p>	<p>12 NACHHALTIGE/R KONSUM UND PRODUKTION</p> 	<p>Bis 2030 die nachhaltige Bewirtschaftung und effiziente Nutzung der natürlichen Ressourcen erreichen.</p> <p>Bis 2020 einen umweltverträglichen Umgang mit Chemikalien und allen Abfällen während ihres gesamten Lebenszyklus in Übereinstimmung mit den vereinbarten internationalen Rahmenregelungen erreichen und ihre Freisetzung in Luft, Wasser und Boden erheblich verringern, um ihre nachteiligen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt auf ein Mindestmaß zu beschränken.</p> <p>Bis 2030 das Abfallaufkommen durch Vermeidung, Verminderung, Wiederverwertung und Wiederverwendung deutlich verringern.</p> <p>Die Unternehmen, insbesondere große und transnationale Unternehmen, dazu ermutigen, nachhaltige Verfahren einzuführen und in ihre Berichterstattung Nachhaltigkeitsinformationen aufzunehmen.</p> <p>Klimaschutzmaßnahmen in die nationalen Politiken, Strategien und Planungen einbeziehen.</p>
<p>13 MASSNAHMEN ZUM KLIMASCHUTZ</p> 	<p>Klimaschutzmaßnahmen in die nationalen Politiken, Strategien und Planungen einbeziehen.</p>		

Abbildung 1: Ausgewählte Ziele und Unterziele der SDG's für nachhaltige Entwicklung mit hoher Relevanz für die Batteriezellfertigung. Eigene Darstellung.

in der Auswirkung sozialen Handelns im Umgang mit Mitarbeitenden oder den Beziehungen zu Interessensgruppen zeigen.

Im Allgemeinen wird in dieser Studie unter dem Begriff „Nachhaltigkeit“ eine nachhaltige Entwicklung verstanden, die *sowohl* auf die drei Leitstrategien

- **Suffizienz** (Verringerung von Produktion und Konsum),
- **Effizienz** (ergiebigere Nutzung von Material und Energie) und
- **Konsistenz** (naturverträgliche Stoffkreisläufe, Wiederverwertung, Müllvermeidung),

als auch auf die als politische Zielsetzungen der Vereinten Nationen (UN) zur weltweiten Sicherung einer nachhaltigen Entwicklung auf ökonomischer, sozialer sowie ökologischer Ebene Bezug nimmt. Diese Ziele wurden auf dem Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung 2015 im Rahmen der so genannten „Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung“ in Form von **17 „Zielen für nachhaltige Entwicklung“** (englisch Sustainable Development Goals, SDGs) formuliert.

Da jedoch nicht alle 17 SDGs bzw. ihre insgesamt 231 Unterziele für die Betrachtung der Nachhaltigkeit von Batterien relevant sind, wird in dieser Studie ein kontextbezogener Auszug berücksichtigt. In Abbildung 1 ist dieser Auszug aufgeführt und dargestellt, welche Ziele und Unterziele für nachhaltige Entwicklung in den thesenbasierten Erörterungen der relevanten Nachhaltigkeitsthemen dieser Studie Berücksichtigung finden.

1.3 Nachhaltigkeit im Entwurf der neuen EU-Batterieverordnung

Die Europäische Kommission hat am 20. Dezember 2020 eine Modernisierung der EU-Rechtsvorschriften für Batterien vorgeschlagen. Der vorgelegte Batterieverordnungsentwurf (BattVO-E) ist integraler Bestandteil des European Green Deals und die erste Initiative der europäischen Kommission zum Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Dementsprechend ist der Verordnungsentwurf durch Nachhaltigkeitsaspekte geprägt, durch die bspw. auch die Sustainable Development Goals (SDGs) aus der Agenda 2030 in Teilen

verwirklicht werden. Entsprechend adressiert der Entwurf die sozialen, ökonomischen und ökologischen Aspekte im Zusammenhang mit Batterien, sieht aber auch eine Regelung des Zugangs zum EU-Binnenmarkt vor. Demnach müssen nicht nur alle Batterien, die in der EU produziert werden, die vorgesehenen Anforderungen an die Nachhaltigkeit erfüllen, sondern auch Batterien aus Drittstaaten, die in der EU auf den Markt gebracht werden. Aufgrund der Größe des europäischen Marktes wird diese Verordnung auch eine entsprechend große Relevanz für Länder außerhalb der EU haben.

Da es sich bei der Batterietechnologie um eine sogenannte General-Purpose-Technologie handelt, die nicht nur in der Automobilindustrie Verwendung findet, sondern positive externe Effekte (Spill-Overs) auf andere Sektoren hat²⁰, sind Batteriezellen zur Schlüsseltechnologie der Energiewende mit enormer strategischer Bedeutung für Europa avanciert. Damit einhergegangen sind technologische Weiterentwicklungen, dynamische Märkte und veränderte sozioökonomische Bedingungen. Um diese dynamische Entwicklung – insbesondere im Hinblick auf Nachhaltigkeitsaspekte – adäquat zu flankieren, ist die derzeitige, seit 2006 bestehende Batterierichtlinie bzw. deren nationale Umsetzung nicht mehr ausreichend. Mit dem vorgelegten BattVO-E werden die Vorschriften im Rechtsrahmen einer Verordnung, die nach Inkrafttreten unmittelbar in allen Mitgliedstaaten gilt und keiner Umsetzung in nationales Recht bedarf, von Grund auf modernisiert. Ziel sind harmonisierte, zukunftsfähige und wegweisende Vorschriften, die mehr Rechtssicherheit für alle Akteure gewährleisten, Anreize für Investitionen in der EU schaffen und die Innovationskraft stärken.

Der Entwurf der neuen Batterieverordnung orientiert sich stark an den Nachhaltigkeitsprinzipien, wobei die ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Aspekte nicht in gleichem Umfang Berücksichtigung finden. Beispielsweise werden soziale Aspekte bei Maßnahmen zur Rohstoffgewinnung stark und in anderen Phasen der Wertschöpfung kaum berücksichtigt.

Allgemein werden folgende Ziele im Entwurf der Batterieverordnung benannt:

- Die **Nachhaltigkeit von Batterien über ihren gesamten Lebenszyklus** durch die Gewährleistung von Mindest-

nachhaltigkeitsanforderungen an Batterien im EU-Binnenmarkt stärken,

- die **Resilienz der Versorgungskette in der EU** durch Schaffung eines geschlossenen Stoffkreislaufs erhöhen, und
- die **ökologischen und sozialen Auswirkungen** über die gesamte Lebensdauer der Batterien minimieren.

Um diese übergeordneten Ziele zu erreichen, werden in dem BattVO-E folgende spezifische Ziele definiert:

Stärkung der Nachhaltigkeit:

- Förderung der Produktion und des Inverkehrbringens hochwertiger und leistungsfähiger Batterien auf den EU-Binnenmarkt,
- Erschließung und Nutzung des EU-Potenzials bei der Verwendung primärer und sekundärer Batterierohstoffe sowie Sicherstellung, dass diese effizient und nachhaltig gewonnen werden,
- Sicherstellung funktionierender Märkte für Sekundärrohstoffe und die Etablierung der damit verbundenen industriellen Prozesse,
- Förderung von Innovation sowie der Entwicklung und Anwendung von technologischem Fachwissen in der EU.

Erhöhung der Resilienz:

- Verringerung der Abhängigkeit der EU von Einfuhren von Materialien mit strategischer Bedeutung,
- Sicherstellung einer angemessenen Sammlung und Wiederverwertung aller Altbatterien.

Minimierung der ökologischen und sozialen

Auswirkungen:

- Beitrag zu einer verantwortungsvollen Beschaffung von Rohstoffen,
- effizienter Einsatz von Rohstoffen und Rezyklaten,
- Senkung der Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus von Batterien,
- Reduzierung der Risiken für die Gesundheit des Menschen und die Qualität der Umwelt sowie Verbesserung der sozialen Bedingungen lokaler Gemeinschaften.

Dementsprechend weist der Verordnungsentwurf mehr Konsens mit den aktuellen EU-Ansätzen zur nachhaltigen Bewirtschaftung von Materialien und Abfällen auf, die den

Fokus auf die Optimierung von Produkten und Produktionsprozessen legen. Der Entwurf ist somit ein Baustein bei der Entwicklung eines EU-Rahmens für den gesamten Lebensweg von Batterien, der harmonisierte und ambitioniertere Vorschriften für Batterien, Komponenten, Altbatterien und Rezyklate umfasst. Durch die klaren gemeinsamen Regeln werden das Funktionieren des EU-Binnenmarkts für Batterien sowie des Marktes für die erforderlichen Primär- und Sekundärmaterialien gewährleistet und zudem die Nachhaltigkeit des EU-Markts gefördert.

2 THESEN ZUR NACHHALTIGEN BATTERIEZELLFERTIGUNG

2.1 Klimaschutz

2.1.1 Die Elektromobilität leistet einen wesentlichen Beitrag zur Emissionsreduktion im Verkehrssektor

- Elementar ist der Ausbau der **erneuerbaren Energien**. Die Energiebereitstellung sowohl für die Batterie(zell)produktion als auch den Fahrzeugbetrieb sind entscheidend für die Treibhausgasbilanz. Je emissionsärmer die Energie bereitgestellt wird, desto größer ist der **Dekarbonisierungseffekt** der Elektromobilität.
- Zielführend ist der Aufbau von Produktionskapazitäten (Batteriezellen) in Europa. Aufgrund der im Vergleich zu China derzeit deutlich **emissionsärmeren Energiebereitstellung** in Europa fällt der CO₂-Fußabdruck in Europa produzierter Zellen geringer aus.
- Maßgebend ist die Kapazität einer Batterie. Je größer die Batteriekapazität, desto höher fällt ihr **produktionsbedingter CO₂-Fußabdruck** und folglich die Laufleistung aus, ab der batterieelektrische Fahrzeuge eine günstigere Emissionsbilanz aufweisen als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

Bei der Herstellung batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge wird derzeit mehr Treibhausgas emittiert als bei vergleichbaren Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor

Die Herstellung von Traktionsbatterien ist sehr energieintensiv. In Abhängigkeit der eingesetzten Kraftwerke und Energieträger wird bei der Bereitstellung der notwendigen thermischen und elektrischen Energie Treibhausgas (THG) emittiert. In Studien^{21 22 23} zu antriebstechnologiespezifischen Produktionsemissionen wird der Glider (eine in der Lebenszyklusanalyse übliche Bezeichnung für das Restfahrzeug ohne Antriebsstrang) aufgrund der für Vergleiche der Antriebs-technologien notwendigen Betrachtung identischer Fahr-

zeugklassen oftmals gleichgesetzt und nur der spezifische Antriebsstrang differenziert betrachtet. Die Gesamtemission der Fahrzeugproduktion (cradle-to-gate) ergibt sich folglich aus der Menge THG, die bei der Produktion des Gliders freigesetzt wird, und der produktionsbedingten Emissionen der spezifischen Komponenten wie Abgassystem, Kupplung und Tanksystem für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ICEV), der Brennstoffzelle für Fahrzeuge mit Brennstoffzelle (FCEV) oder der Traktionsbatterie für batterieelektrische Fahrzeuge (BEV). Aufgrund der unterschiedlichen Energieintensität der antriebstechnologiespezifischen Herstellungsprozesse wird bei identischer Energieversorgung bei der Produktion von Fahrzeugen mit Brennstoffzelle (FCEV) mehr CO₂-eq emittiert als bei vergleichbaren ICEV und weniger als bei vergleichbaren BEV.²⁴ Ohne Berücksichtigung der Batterieproduktion fällt die herstellungsbedingte Emission bei BEV etwas niedriger als die von vergleichbaren ICEV aus. Dass die Emissionsbilanz zum Zeitpunkt der Fahrzeugauslieferung (gate) in einigen Studien dennoch für BEV um bis zu Faktor 2 höher ausfällt²⁵, ist auf die energieintensive Batterieproduktion zurückzuführen.

Die Emissionen der Energiebereitstellung für den Herstellungsprozess der Batterien haben folglich einen enormen Einfluss auf die THG-Bilanz von BEV. Ausgehend von Primärrohstoffen beziffern Emilsson & Dahllöf die Emission der Herstellung von Nickel-Mangan-Kobalt-basierten (NMC 111) Lithium-Ionen-Batterien auf 61–106 kg CO₂-eq pro Kilowattstunde (kWh).²⁶ Koch et al. führen in einer Studie herstellungsbedingte Emissionen von Batterien identischer Technologie von etwa 180 kg CO₂-eq bzw. 120 kg CO₂-eq pro kWh an – je nachdem, ob die Batterie in China oder Europa produziert wird.²⁷ Sowohl die Energieeffizienz der Herstellungsprozesse als auch die kraftwerksabhängige Energiebereitstellung beeinflussen den THG-Ausstoß, sodass die Emissionen der Batterieherstellung nur als Wertebereiche angegeben werden und der Studie von Koch et al. zufolge bei der Batterieproduktion derzeit in Europa um ein Drittel

21 Transport & Environment, 2017

22 Sternberg et al., 2019

23 Koch et al., 2020

24 Sternberg et al., 2019

25 Koch et al., 2020

26 Emilsson & Dahllöf, 2019

27 Koch et al., 2020

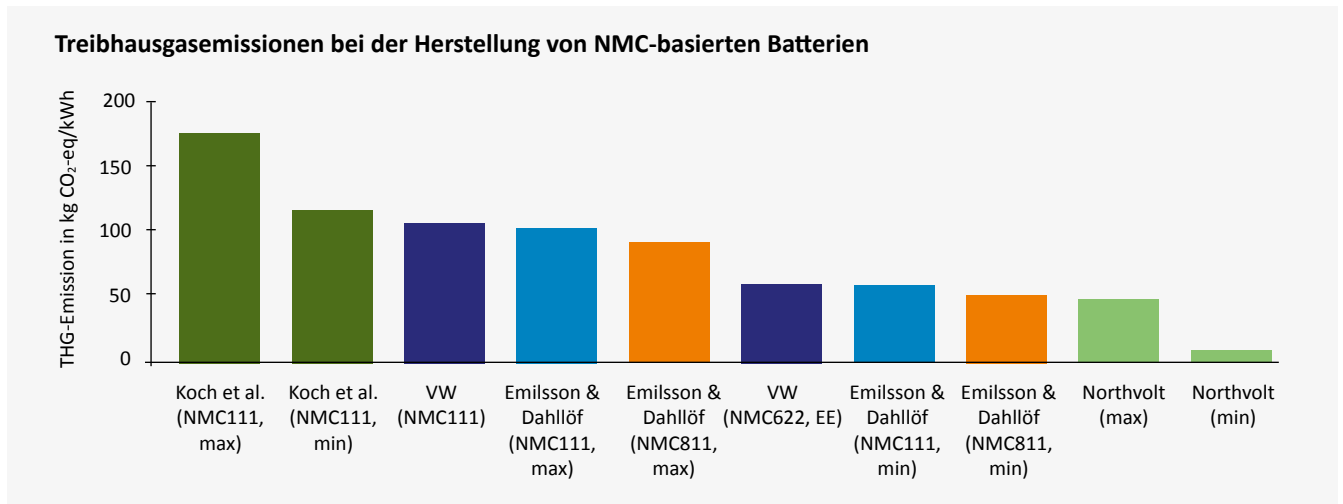


Abbildung 2: Auf die Speicherenergie normierte Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von NMC-basierten Batterien in kg CO₂-eq pro kWh. Identische Quellen sind je Technologie farblich codiert. Eigene Darstellung.

geringer ausfallen als in China. Je nach in den Analysen zugrundeliegenden Annahmen liegen die Emissionen zwischen 61 und 180 kg pro Kilowattstunde speicherbare Energie und unterscheiden sich damit um bis zu Faktor 3 (vgl. Abbildung 2). Für eine durchschnittliche 50 kWh-Batterie bedeutet dies einen absoluten Unterschied von knapp 6 Tonnen CO₂-eq zwischen den beiden Extremwerten, was etwa der Emission der Produktion des Gliders entspricht.

Neben dem Produktionsstandort und der davon abhängigen THG-Emission der Energiebereitstellung beeinflusst vor allem die Zelltechnologie die Emissionsbilanz. Emilsson & Dahllöf beziffern die Reduktion der THG-Emissionen bei der Herstellung von Zellen mit aktueller Technologie (NMC 811) aufgrund ihrer höheren Energiedichte auf 14 % im Vergleich zu NMC 111. Infolge der Umstellung auf NMC 622 und der Vereinbarung mit den Batteriezelllieferanten, Strom aus erneuerbaren Energien zu verwenden, gibt VW nahezu eine Halbierung des spezifischen CO₂-Fußabdrucks der eingesetzten Batterien von 110 auf 62 kg CO₂-eq/kWh an.²⁸ Laut eigenen Angaben will Northvolt durch Materialrecycling und innovative Beschaffungsstrategien mittelfristig eine produktionsbedingte Emission zwischen 10 und 50 kg CO₂-eq pro kWh erreichen.

Abbildung 2 visualisiert die enorme Spanne an herstellungsbedingten und auf den Energiegehalt normierten Emissionen

der Batterieproduktion. Ursächlich sind sowohl die Emissionen der Energiebereitstellung, die Energieintensität der Herstellung als auch die Energiedichte der jeweiligen Batterietechnologie. Auf die Produktion einer Batterie mit einem Energiegehalt von 50 kWh bezogen werden je nach Batterietechnologie, Herstellungsprozess und Energiebereit-

Erhöhte Treibhausgasemission in der Transformationsphase

Diese hohen produktionsbedingten THG-Emissionen fallen gleichermaßen für Batterien an, die aus Vorserienproduktionen, Prototypen-Fahrzeugen, Rückrufen oder Fehlproduktion stammen und somit unmittelbar nach der Produktion oder zumindest weit vor dem technologischen Lebensende einer Wiederverwertung zugeführt werden. Wie das Handelsblatt berichtet, bringt der Hochlauf der Elektromobilität derzeit hunderte Tonnen Batterien mit sich, die nicht weiterverwendet, sondern weit vor dem Erreichen ihres Lebensendes recycelt werden (vgl. Kapitel 2.3).ⁱ Während des Transformationsprozesses der Automobilindustrie und des Auf- und Ausbaus der Batteriezellfertigung wird folglich zunächst mehr THG emittiert.

ⁱ Scholz, 2021

stellung zwischen 500 und 6.000 kg CO₂-eq emittiert. Diese beispielhafte Betrachtung der absoluten Produktionsemissionen verdeutlicht nicht nur deren große Bandbreite, sondern illustriert auch den Einfluss der Batteriekapazität auf die THG-Bilanz von BEV. Je größer die Speicherkapazität der Batterie und damit die Reichweite des BEV ausfällt, desto höher ist auch der Unterschied zu vergleichbaren ICEV – insbesondere dann, wenn nicht Batterietechnologien mit hoher Energiedichte verwendet werden.

Der höhere Energiebedarf der Herstellungsprozesse bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben und insbesondere die der Batterieproduktion bekräftigen die dringende Notwendigkeit, die Produktion energieeffizient umzusetzen und die benötigte Energie THG-emissionsarm bereitzustellen. Wie aktuelle Studien zeigen, kann die THG-Emission der Batterieherstellung um bis zu Faktor 3 variieren. Aufgrund der aktuellen standortbezogenen Unterschiede der Energiebereitstellung resultiert aus der Produktion von Batteriezellen am Standort Europa anstelle einer Produktion in China eine unmittelbare und signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen. Auch China setzt auf einen Ausbau der erneuerbaren Energien, was zukünftig zu geringeren produktionsbedingten THG-Emissionen führen wird. Allerdings sind die letztjährigen Fortschritte und auch die zukünftigen

Ziele seitens der europäischen Energiewirtschaft deutlicher und ambitionierter (s. Kapitel 2.1.2). Infolgedessen bietet der Standort Europa hinsichtlich der produktionsbedingten THG-Emissionen und damit auch für die THG-Bilanz über den gesamten Lebenszyklus von Elektrofahrzeugen bereits heute Vorteile und wird diese in den kommenden Jahren noch ausbauen.

Der Betrieb batterieelektrischer Fahrzeuge ist klimagünstiger als der von Fahrzeugen mit Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotor

Bereits die Energieversorgung (well-to-tank), d.h. die Bereitstellung von Kraftstoff an der Zapfsäule oder elektrischer Energie an der Ladesäule, ist energieaufwändig. Die Treibhausgasemissionen der Gewinnung und Verarbeitung von Rohöl betragen rund ein Viertel der Emissionen des Fahrzeugbetriebs (26% der tank-to-wheel-Emissionen für Benzin und 28% für Diesel).^{29 30} Umgerechnet auf den Energiegehalt von Benzin bzw. Diesel beträgt die well-to-tank-Emission etwa 73 bzw. 75 g CO₂-eq pro kWh. Die Emissionen der Stromerzeugung hängen stark von den eingesetzten Kraftwerken und Energieträgern ab. Die durchschnittliche THG-Emission der Stromerzeugung betrug im Jahr 2020 in Deutschland 413 g CO₂-eq pro Kilowattstunde und in der EU-27 319 g CO₂-eq/kWh.³¹ Bei der Erzeugung von Wasserstoff aus

Eine exemplarische Betrachtung der betriebsbedingten Emissionen (well-to-wheel) am Beispiel eines VW Golf VIIⁱ zeigt, dass ein Modell mit einem 96 kW starken Ottomotor pro 100 km etwa 17,6 kg CO₂-eq und ein batterieelektrisches Modell mit 100 kW pro 100 km etwa 7,5 kg CO₂-eq emittiert.

	Verbrauch pro 100 km	Emissionen Energiebereitstellung (w-t) CO ₂ -eq (Energie für 100 km)	Emissionen Betrieb (t-w) CO ₂ -eq pro 100 km	Gesamtemission (w-t-w) CO ₂ -eq pro 100 km
Golf VII	5,9 l (Super)	3.623 g	13.983 g	17.606 g
Golf VII e	18,2 kWh	7.517 g	-	7.517 g

i ADAC, 2021a und 2021b

ii Verbrauch nach WLTP kombiniert. Ladeverluste werden bei dem Test vom ADAC mit einberechnet. Quelle: ADAC, 2021c

29 Knobloch et al., 2020

30 Bei der Benzin- bzw. Dieselherstellung aus Rohöl werden pro Liter etwa 614 bzw. 735 g CO₂-eq emittiert. Ebd.

31 Transport & Environment, 2020b

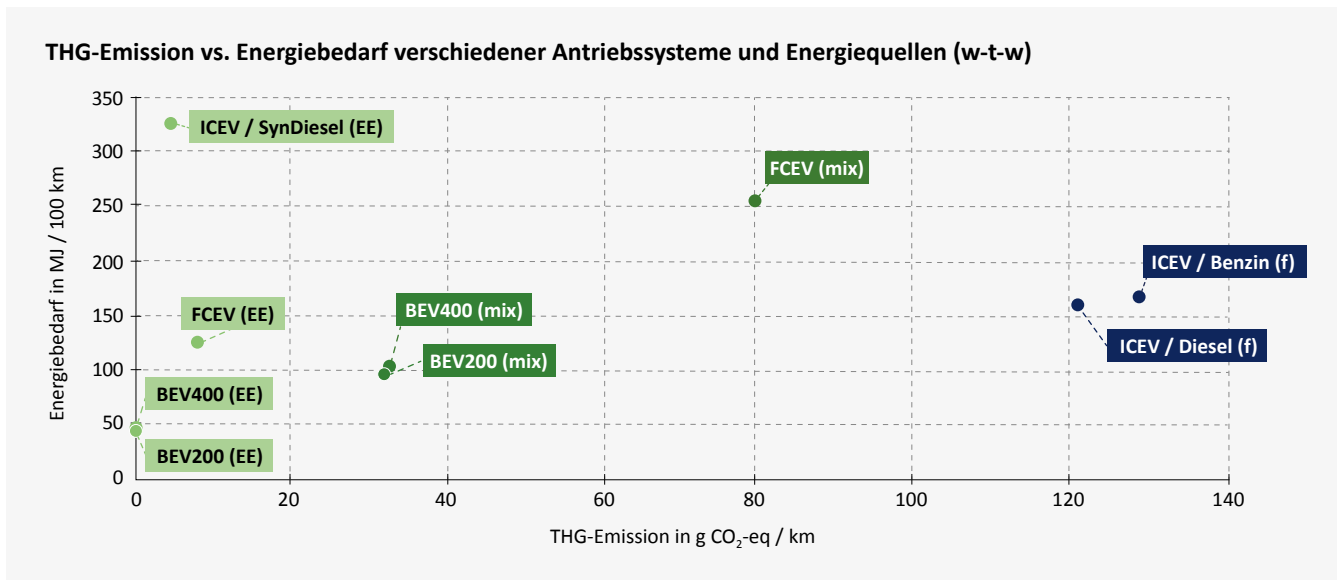


Abbildung 3: Well-to-wheel-Betrachtung: THG Emissionen und Energiebedarf verschiedener Antriebstechnologien bzw. Energiequellen (f=fossil; mix=EU Strommix; EE=erneuerbare Energien). Nach JEC Well-To-Wheels report v5.

Strom (power-to-gas) fallen entsprechende Emissionen aus der Stromerzeugung an, jedoch muss der Wasserstoff anschließend noch energieaufwändig in einen transportfähigen Zustand gebracht werden (vgl. Abbildung 3). Die beim Transport der Kraftstoffe zur Tankstelle bzw. des Stroms zur Ladesäule entstehenden Emissionen durch entsprechende Tankfahrzeuge bzw. Leistungsverluste werden hier nicht berücksichtigt.

Durch den Betrieb der Fahrzeuge (tank-to-wheel), d. h. der Umwandlung der chemischen bzw. elektrochemischen Energie in Bewegungsenergie werden im Gegensatz zu den lokal emissionsfreien BEV und FCEV durch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren sowohl Treibhausgase als auch Luftschadstoffe freigesetzt. Pro Personenkilometer im Pkw wurden 2020 in Deutschland im Mittel 143 g CO₂-eq, 0,95 g Kohlenmonoxid, 0,14 g flüchtige Kohlenwasserstoffe, 0,39 g Stickoxide und 0,005 g Partikel³² emittiert.³³ Trotz gesunkener spezifischer Emissionen infolge verschärfter Abgasvorschriften für neu zugelassene Pkw und verbesserter Qualität des in Verkehr gebrachten Kraftstoffes haben sich die Gesamtemissionen der unterschiedlichen Luftschadstoffe des Pkw-Verkehrs

zwischen 1995 und 2018 inhomogen entwickelt. Während die Stickstoffoxid-Emissionen um 33% und die Partikelmasse-Emissionen um nahezu 80% gesunken sind, stieg die gesamte Kohlendioxid-Emission um 3,7% an.³⁴ Im Betrieb zeigen sich folglich große Unterschiede zwischen den Antriebstechnologien. Während bei der Nutzung von BEV und FCEV aufgrund des derzeitigen Strommixes Treibhausgase und Luftschadstoffe ausschließlich indirekt freigesetzt werden, emittieren ICEV im Betrieb auch direkt Treibhausgase und Luftschadstoffe.

In Abbildung 3 ist der Energiebedarf (well-to-wheel) verschiedener Antriebstechnologien je 100 km Fahrstrecke in Abhängigkeit der Energiequelle über deren Treibhausgasemissionen aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist, dass mit fossilen Kraftstoffen betriebene ICEV die höchsten THG-Emissionen in diesem Vergleich aufweisen, aber bezüglich des Energiebedarfs im Mittelfeld liegen. Deutlich weniger THG emittieren ICEV, die mit synthetischem Diesel betrieben werden. Allerdings ist in diesem Fall der Energiebedarf aufgrund des energieintensiven Herstellungsprozesses des Kraftstoffes der höchste. Auf vergleichbarem Emissionsniveau liegen BEV

32 Ohne Berücksichtigung von Reifen- oder Straßenabrieb.

33 Umweltbundesamt, 2021a

34 Umweltbundesamt, 2020

und FCEV, die mit Strom aus erneuerbaren Energien bzw. mit Wasserstoff, der aus diesen erzeugt wird, betrieben werden. Hier wird jedoch der hohe Energieaufwand bei der Wasserstoffherzeugung und Umwandlung in einen transportfähigen Zustand deutlich, infolgedessen der Betrieb von FCEV mehr als zweimal so energiebedürftig ist wie der von BEV.

Eine von PricewaterhouseCoopers durchgeführte Vergleichsstudie zur Energieeffizienz von Antriebstechnologien (well-to-wheel), bei denen erneuerbare Energien und keine fossilen Energieträger zum Einsatz kommen, zeigt, dass der Betrieb batterieelektrischer Fahrzeuge energetisch am günstigsten ist. Ausgehend von klimaneutraler elektrischer Energie aus erneuerbaren Energien (Sonne, Wind) sind für deren Umsetzung in 1 kWh mechanische Energie (Bewegung) per BEV 1,4 kWh, per FCEV 2,8 kWh und per ICEV, die mit synthetischen Kraftstoffen betrieben werden, 8,7 kWh nötig.³⁵ Fahrzeuge mit diesen Antriebstechnologien emittieren im Betrieb netto deutlich weniger THG als konventionell betriebene und tragen somit enorm zur Dekarbonisierung des Verkehrs bei. Jedoch wird der Unterschied in der Energieeffizienz bei einer Betrachtung der jeweiligen Strombedarfe für den hypothetischen Fall, dass die Laufleistung aller Pkw, die in Deutschland im Jahr 2018 erbracht wurde, mit nur einer Antriebstechnologie bewerkstelligt wird, besonders deutlich. Würde die Laufleistung per BEV erbracht, wären für deren Betrieb etwa 90 TWh elektrischer Energie nötig und damit etwa 40 % des in dem Jahr in Deutschland erzeugten Stroms aus erneuerbaren Energien. Würde die Laufleistung ausschließlich per FCEV erbracht, wären etwa 100 % des 2018 in Deutschland erzeugten Stroms aus erneuerbaren Energien zur Versorgung mit „grünem Wasserstoff“ notwendig.

Je nach Laufleistung sind batterieelektrische Fahrzeuge bereits heute klimafreundlicher als Fahrzeuge mit Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotor

Unter Berücksichtigung der produktions- und betriebsbedingten THG-Emissionen, die signifikant von den Rahmenbedingungen wie Produktionsstandort und Batteriekapazität abhängen, weist ein batterieelektrisches Fahrzeug zum Auslieferungszeitpunkt derzeit eine höhere und im Betrieb eine geringere Emission auf als ein ähnliches, mit Verbrennungsmotor angetriebenes Fahrzeug. Unter der Voraussetzung,

dass die chemische bzw. elektrochemische Energie für die Traktion aus erneuerbaren Energien stammt, sind BEV deutlich energieeffizienter als die übrigen Antriebstechnologien.

In Abhängigkeit der Emissionsdifferenz nach der Produktion und der Emissionen der Energiewirtschaft, die die elektrische Energie für das Laden erzeugt, ergibt sich ab einer bestimmten Laufleistung eine Gesamtemissionsparität. Vor Erreichen dieser Laufleistung fällt die Emissionsbilanz für BEV schlechter aus. Bei einer Fahrzeugnutzung über diese Laufleistung hinaus ist die Bilanz für BEV besser. Diese dezisive Laufleistung ist von zahlreichen Faktoren abhängig und fällt umso geringer aus, je emissionsärmer die Energiebereitstellung sowohl für die Produktion als auch für den Fahrzeugbetrieb erfolgt, je kleiner die Speicherkapazität der Batterie ausfällt und je höher die Energiedichte der Batterie ist. Für den exemplarischen Vergleich eines VW Golf VII mit Ottomotor und einem mit batterieelektrischem Antrieb (s. Infobox auf S. 12) liegt die dezisive Laufleistung in der tank-to-wheel-Betrachtung bei etwa 60.000 km und in der well-to-tank-Betrachtung bei knapp 50.000 km.³⁶ Unter Verwendung der Daten zu THG-Emission des aktuellen europäischen Strommixes sowie denen, die laut VW bei der Herstellung aktueller NMC 622-Zellen freigesetzt werden, reduziert sich die Laufleistung auf etwa 25.000 bzw. knapp 20.000 km.

In den kommenden Jahren wird diese Mindestlaufleistung, ab der BEV klimafreundlicher als alternative Antriebe sind, immer geringer ausfallen. Einerseits konnte die Energiewirtschaft durch einen starken Ausbau der erneuerbaren Energien die Emissionen der Stromproduktion in den letzten Jahren deutlich senken und wird diese Entwicklung aufgrund von Regularien (s. Kapitel 2.1.2) auch in den nächsten Jahren fortsetzen. Andererseits führen der Auf- und Ausbau der Produktionskapazitäten für Batteriezellen in Europa sowie die Zunahme der Energiedichte bei den Traktionsbatterien zu immer geringeren Emissionsdifferenzen zwischen BEV und ICEV zum Zeitpunkt der Fahrzeugauslieferung. Dem wirken sowohl der Trend zu immer höheren Batteriekapazitäten als auch eine Effizienzsteigerung der Verbrennungsmotoren entgegen. Letzteres führt allerdings aufgrund des bereits sehr hohen technischen Reifegrads nur zu einer marginalen Zunahme der dezisiven Laufleistung von BEV.

35 Bollmann et al., 2017

36 Die Berechnung basiert auf der THG-Emission der Stromerzeugung im Jahr 2020 in Deutschland i. H. v. 413 g CO₂-eq pro Kilowattstunde sowie die von VW für die Herstellung von NMC111 Batterien genannte THG-Emission i. H. v. 110 kg CO₂-eq pro Kilowattstunde. Die THG-Emission der Produktion der Glider wurde für das Modell mit Ottomotor mit 8,0 t CO₂-eq und für das batterieelektrische mit 8,1 t CO₂-eq angenommen.

2.1.2 Neue klimapolitische Regelungen und Instrumente erhöhen den Handlungsdruck, die Dekarbonisierung des Verkehrssektors in der EU voranzutreiben

- Die **Dekarbonisierung** des Verkehrssektors ist dringend geboten, da er der einzige Sektor ist, in dem die Emissionen seit 1990 zugenommen haben.
- **Klimapolitische Regelungen und Instrumente** machen klare Vorgaben zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors, schaffen die notwendigen Rahmenbedingungen und setzen zusätzliche Anreize.
- Die neue **Batterieverordnung** wird für Transparenz und fairen Wettbewerb für nachhaltige Batterien in Europa sorgen.

Die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor sind zu hoch

Die Treibhausgasemissionen in der EU-27 sind zwischen 1990 und 2019 insgesamt um 24 % gesunken, wodurch das Ziel einer Reduzierung um 20 % gegenüber 1990 bis 2020 vorzeitig übertroffen wurde.³⁷ Der Verkehr ist jedoch der einzige Sektor, in dem die Emissionen im gleichen Zeitraum deutlich zugenommen haben (+23,7 %).³⁸

Die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor in Deutschland lagen 2019³⁹ mit 165,5 Mio. t CO₂-eq ebenfalls über dem Wert von 1990 (164,9 Mio. t CO₂-eq).⁴⁰ Die Hauptgründe für den anhaltend hohen CO₂-Ausstoß im Verkehrssektor sind die Dominanz fossiler Kraftstoffe, die Zunahme der Fahrleistung, schwerere Fahrzeugmodelle im Personenverkehr sowie die steigende Zahl von Autos und Flügen im Personen- und Güterverkehr.⁴¹ In Deutschland ist der motorisierte Straßenverkehr für 94 % der Treibhausgasemissionen des

Verkehrssektors verantwortlich. Davon entfallen etwa 59 % auf Personenkraftwagen (Pkw) und 35 % auf Lastkraftwagen (Lkw) sowie andere Nutzfahrzeuge.

Klimaabkommen und nationales Klimaschutzziel machen klare Vorgaben

Im April 2021 haben sich die EU-Staaten mit dem EU-Parlament darauf verständigt, das EU-Klimaziel für das Jahr 2030 von einer Mindestreduktion der Emissionen um 40 % gegenüber 1990 auf 55 % anzuheben. Die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor müssen demnach von in der EU verkauften Pkw bis 2030 im Durchschnitt um 37,5 % und bei neuen Transportern um durchschnittlich 31 % pro Kilometer gegenüber dem Stand von 2021 gesenkt werden.⁴² Mit der Verabschiedung der Verordnung (EU) 2019/631 wurde der bis 2019 geltende CO₂-Flottengrenzwert, d. h. die Obergrenze für die durchschnittliche CO₂-Emission aller in der EU in einem Jahr zugelassenen Fahrzeuge von 130 auf 95 g CO₂/km im Jahr 2020 deutlich abgesenkt.

Laut nationalem Klimaschutzziel ist die Emission im Verkehrssektor in Deutschland bis 2030 um 40 bis 42 % im Vergleich zu 1990 zu mindern. In absoluten Zahlen bedeutet dies eine Reduktion der Emissionen von 164 auf 98 bis 95 Mio. t CO₂.⁴³ Infolge des als verfassungswidrig beurteilten deutschen Klimaschutzgesetzes will die Bundesregierung die Klimaschutzvorgaben verschärfen.⁴⁴ Bis 2030 soll demnach eine Treibhausgasminderung von 65 % (gegenüber dem Emissionsniveau von 1990) erzielt und die Treibhausgasneutralität bereits 2045 erreicht werden. Der aktuelle Gesetzesentwurf sieht vor, dass die Energiewirtschaft den größten Beitrag leistet, jedoch ist auch dem Verkehrssektor eine um mehr als 10 % erhöhte Emissionsreduktion bis 2030 zudedacht. Vor dem Hintergrund der nahezu identischen verkehrsbedingten Emissionen in den Jahren 1990 und 2019, ist die signifikante

37 European Environment Agency, 2020a

38 European Environment Agency, 2020b

39 Update: 145,6 Mio. t CO₂-eq in 2020 und damit 19 Mio. Tonnen niedriger als im Vorjahr (minus 11,4 %) – und damit ebenfalls unter der im Bundesklimaschutzgesetz für 2020 festgelegten Jahresemissionsmenge von 150 Mio. Tonnen CO₂. Der Hauptteil dieser Minderung ist jedoch pandemiebedingt und darauf zurückzuführen, dass während des ersten Lockdowns weniger Auto gefahren wurde, vor allem auf den langen Strecken. Dies stellt aus Sicht der Autor:innen eine einmalige und vor allem nicht beständige Entwicklung dar, die hier nicht berücksichtigt wird.

40 Umweltbundesamt, 2021b

41 BMU, 2020

42 Regulation (EU) 2019/631

43 Die Bundesregierung, 2021b

44 Die Bundesregierung, 2021a

Emissionsreduktion entsprechend vollständig in dem aktuellen Jahrzehnt zu erzielen.

Regulative Stimulation der Elektromobilität führt zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors

Die Emissionsbilanz batterieelektrisch betriebener Fahrzeuge ist, wie in Kapitel 2.1.1 dargelegt, ab einer bestimmten Laufleistung geringer als die von vergleichbaren Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Im Hinblick auf die Nutzung von erneuerbaren Energien weisen BEV zudem mit Abstand die höchste Effizienz auf. Folglich tragen BEV, die anstelle von ICEV genutzt werden und deren Laufleistung den Grenzwert übersteigt, unmittelbar zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors bei.

Nach zunächst sehr geringen Zulassungszahlen hat der Markthochlauf von Elektrofahrzeugen zuletzt deutlich an Dynamik gewonnen. Der Effekt des EU-Flottengrenzwerts auf die Zulassungszahlen batterieelektrisch angetriebener Fahrzeuge im Jahr 2020 ist deutlich zu erkennen. Die Ankündigung hoher Geldstrafen bei Nichteinhaltung der EU-weiten CO₂-Emissionsziele für Fahrzeugflotten gaben sowohl dem Angebot als auch dem Verkauf von Elektroautos (batterieelektrisch, BEV und Plug-in-Hybrid-elektrisch, PHEV) einen Schub. Trotz der COVID-19-Krise, die zu einem Rückgang der Autoverkäufe in Europa um 25 % im Jahr 2020 geführt hat, konnte die Gesamtzahl der in Europa im gleichen Zeitraum verkauften Elektroautos mehr als verdoppelt werden und stieg von etwa einer halben Million Fahrzeuge im Jahr 2019 auf mehr als 1,3 Millionen im Jahr 2020 (mehr als eine Million in der EU-27)⁴⁵ an. Infolgedessen wurde der chinesische EV-Markt zum ersten Mal von Europa übertroffen.⁴⁶

Infolge der zuletzt deutlich gestiegenen Marktanteile elektrisch angetriebener Fahrzeuge werden mittelfristig viele die Mindestlaufleistung erreichen und somit zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors beitragen. Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien und der damit einhergehenden Emissionsreduktion der Stromerzeugung wird sich der positive THG-Effekt der Elektromobilität zudem mittelfristig weiter erhöhen.

Energiewirtschaftliche Voraussetzungen für alternative Antriebe sind gegeben

Sowohl in den EU-27 als auch in Deutschland wurden die THG-Emission der Energiewirtschaft 2020 im Vergleich zu 1990 um über 30% reduziert. Dies ist auf die Minderung des Einsatzes stark emittierender Energiequellen sowie den Ausbau erneuerbarer Energien zurückzuführen und hat direkten Einfluss auf das THG-Emissionsreduktionspotenzial alternativ angetriebener Fahrzeuge. Denn die Abhängigkeit der Emissionen von BEV von der emissionsarmen Energiebereitstellung und somit vom Einsatz erneuerbarer Energien sowohl bei der Fahrzeug- und Zellproduktion als auch beim Laden der Traktionsbatterien ist immens (vgl. Kapitel 2.1.1). Je weniger THG bei der Bereitstellung der notwendigen Energie emittiert werden, desto größer ist der Beitrag von BEV zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors.

Die Minderung des Einsatzes stark emittierender Energiequellen ist auf das zentrale europäische Klimaschutzinstrument zurückzuführen, den 2005 zur Umsetzung des internationalen Klimaschutzabkommens von Kyoto eingeführten Europäischen Emissionshandel (EU-ETS). Im EU-ETS werden die Emissionen von europaweit rund 11.000 Anlagen der Energiewirtschaft und der energieintensiven Industrie erfasst, die zusammen rund 40% der THG in Europa verursachen. Innerhalb einer kontinuierlich absinkenden Emissionsobergrenze können die Emissionsberechtigungen auf dem Markt frei gehandelt werden. Hierdurch bildet sich ein perspektivisch steigender Preis für den Ausstoß von Treibhausgasen, der Anreize bei den beteiligten Unternehmen setzt, ihre Treibhausgasemissionen zu reduzieren.

Der Ausbau der erneuerbaren Energien setzt sich fort. Im Jahr 2019 wurden 19,7% des Endenergiebedarfs in den EU-27 aus erneuerbaren Energien gedeckt.⁴⁷ In Deutschland lag der Anteil 2019 bei 17,4%, wobei der Anteil des Stroms aus erneuerbaren Energien am Bruttostrombedarf 42% ausgemacht hat. Im Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2021) ist das Ziel für Deutschland verankert, den Anteil des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms am Bruttostrombedarf auf 65% im Jahr 2030 zu steigern.⁴⁸ Der aktuell bereits hohe und zu-

45 Transport & Environment, 2020a

46 Transport & Environment, 2021a

47 Eurostat, 2021

48 EEG, 2021

künftig weiter zunehmende Anteil von erneuerbaren Energien ist eine notwendige Voraussetzung dafür, dass die Emissionsreduktion im Verkehrssektor durch Transformation der Antriebstechnologie größtmögliche Wirkung entfalten kann.

Die Bepreisung von CO₂ begünstigt eine emissionsarme Mobilität

Eine neue Säule im Klimaschutzprogramm der Bundesregierung ist die Anfang 2021 in Kraft getretene CO₂-Bepreisung im Verkehrssektor.⁴⁹ Um Emissionen im Verkehr weiter zu reduzieren, wird – in Analogie zum europäischen Emissionshandel in der Energiewirtschaft und der energieintensiven Industrie – mit dem nationalen Emissionshandelssystem (nEHS) ein Anreiz gesetzt, die verkehrsbedingten Emissionen in Deutschland zu senken. Über das nEHS werden Zertifikate an die Unternehmen verkauft, die Heiz- und Kraftstoffe in Deutschland in Verkehr bringen. Für jede Tonne CO₂, die die Stoffe im Verbrauch verursachen werden, müssen die Unternehmen fortan ein Zertifikat als Verschmutzungsrecht erwerben. Die Kosten dafür betragen seit Januar 2021 25 Euro und steigen schrittweise auf 55 Euro im Jahr 2025 an. Für das Jahr 2026 ist ein Preiskorridor von mindestens 55 und höchstens 65 Euro vorgesehen. Infolgedessen steigen die Preise für Benzin und Diesel unmittelbar und in den kommenden Jahren kontinuierlich weiter an, wodurch emissionsarme Mobilitätsformen fortlaufend indirekt begünstigt werden.

Die Deklaration des Fußabdruckes der Zellproduktion schafft Transparenz und fairen Wettbewerb

Der Entwurf einer neuen EU-Batterieverordnung (COM/2020/798 final, „BattVO-E“)⁵⁰ sieht u. a. die Einführung von schrittweise zunehmenden Anforderungen an Batterien vor, die zukünftig im Unionsmarkt in Verkehr gebracht werden, die auf die Minimierung des CO₂-Fußabdrucks über den gesamten Lebensweg von Batterien abzielen. Im Dezember 2020 hat die Europäische Kommission den Batterieverordnungsentwurf veröffentlicht (s. Kapitel 1.3), bei dem es sich um den ersten konkreten Gesetzesvorschlag der im Rahmen der Umsetzung des neuen Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft⁵¹ von März 2020 handelt, der wiederum einen wesentlichen Baustein des European Green Deal⁵² darstellt.

Laut BattVO-E ist zuerst eine Informationspflicht vorgesehen. Den technischen Unterlagen für wieder aufladbare Industriebatterien und Traktionsbatterien mit einer Energie von mehr als 2 kWh, die in der EU in Verkehr gebracht werden, soll dem BattVO-E zufolge eine Erklärung zum CO₂-Fußabdruck beigefügt werden, um für Transparenz hinsichtlich der Emissionen bei der Batterieproduktion zu sorgen. Um den Unionsmarkt mittelfristig auf CO₂-ärmere Batterien zu verlagern – unabhängig davon, wo diese hergestellt werden –, ist im BattVO-E eine schrittweise und kumulative Erhöhung der Anforderungen an den CO₂-Fußabdruck intendiert. Vorgesehen ist eine leistungsklassenspezifische Emissionshöchstgrenze, die im Hinblick auf das Inverkehrbringen im Unionsmarkt nicht überschritten werden darf.

Die transparente Angabe der Emissionen der Herstellung sowie die Festlegung von Obergrenzen für das Inverkehrbringen schafft eine faire Wettbewerbsumgebung für nachhaltig produzierte „grüne“ Batterien. Die infolge dieser Anforderungen auf dem Lebensweg von Batterien vermiedenen CO₂-Emissionen tragen zudem zum Ziel der EU bei, bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität zu erreichen.

Die Elektrifizierung von Fahrzeugen allein reicht nicht aus, um mittelfristige Klimaschutzziele im Verkehrssektor zu erreichen

Die derzeitige europäische Flottenemissionsnorm reicht selbst in der ambitionierteren, revidierten Form (vgl. Abschnitt „Klimaabkommen und nationales Klimaschutzziel machen klare Vorgaben“) nicht aus, um die deutschen Klimaschutzziele für den Verkehrssektor zu erreichen, wie aktuelle Berechnungen zeigen.⁵³ Deren Analyse des kurz- bzw. mittelfristigen Reduktionspotenzials führt zu dem Erkenntnis, dass sogar ein sehr ambitioniertes Szenario (95% neu zugelassene Elektrofahrzeuge in 2030) bis 2030 lediglich zu einer Minderung der THG-Emissionen um 27% gegenüber 2019 bzw. 1990 führt (das derzeitige nationale Klimaschutzziel sieht eine Reduktion um 40 bis 42% vor). Grund sind nicht zuletzt die Bestandsfahrzeuge, die aufgrund ihrer durchschnittlichen Lebensdauer auch 2030 noch am Markt sein werden. Auch dem Referenzszenario der Natio-

49 Die Bundesregierung, 2019

50 Europäische Kommission, 2020d

51 Europäische Kommission, 2020e

52 Europäische Kommission, 2019b

53 Rudolph & Jochem, 2021

nenal Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) zufolge werden sich die Emissionen im Verkehrssektor von etwa 165 auf 150 Mio. t CO₂-eq. bis 2030 verringern. Für die Erreichung des aktuellen Klimaschutzziels im Verkehr bleibt laut NPM somit eine Minderungslücke von weiteren 52 bis 55 Mio. t CO₂-eq.⁵⁴ Langfristig, d. h. bis 2050, erwarten viele Analysten zwar eine starke Emissionsreduktion, doch in einer aktuellen Studie von Transport & Environment wird der mittelfristige Reduktionseffekt als zu gering bewertet und im Hinblick auf die Erreichung der Klimaschutzziele geschlussfolgert, die Transformation bereits jetzt weiter zu beschleunigen.⁵⁵ Dem gegenüber stehen jedoch Warnungen seitens der Industrie. Laut VDA verstärkt bspw. eine Verschärfung der EU-Klimaziele in der Corona-Krise den Druck auf die in einem Transformationsprozess befindliche Automobilindustrie.⁵⁶

2.2 Industriepolitik

- Nachhaltige Batterien sind ein wesentlicher Stützpfeiler des **europäischen Green Deals**. Der Anspruch, bis 2050 klimaneutral zu sein, erfordert **technologische Innovationen** in der Batteriewertschöpfung durch die Europa weltweit Impulse setzen kann.
- Viele **europäische Initiativen** tragen zur Vernetzung relevanter Akteure und zum Aufbau einer intakten und nachhaltigen Batteriewertschöpfung in Europa bei. Strategische Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen fördern die notwendigen technologischen Innovationen.
- Bereits jetzt gibt es zahlreiche und vielfältige **Kooperationen und Vernetzungen**. Die Kooperationen verdeutlichen die Aktivitäten entlang der gesamten **Wertschöpfungskette** und tragen zu einem beschleunigten Aufbau bei.

2.2.1 Kooperation und politische Steuerung führt zu einer konkurrenzfähigen und nachhaltigen Batterieproduktion in Europa

Der europäische Green Deal forciert die Entwicklung fortschrittlicher Technologien

Der im Dezember 2019 vorgestellte europäische Green Deal hat zum Ziel, Europa bis 2050 klimaneutral zu machen und das Wirtschaftswachstum von der Ressourcennutzung zu entkoppeln.⁵⁷ Hierfür wurde ein Aktionsplan mit Maßnahmen erstellt, der sich über alle Wirtschaftszweige erstreckt.⁵⁸

Neben Maßnahmen zum Aufbau einer Kreislaufwirtschaft (vgl. Kapitel 2.3) sollen Investitionen in strategische Wertschöpfungsketten zur Erreichung der Ziele beitragen. Hierbei sind nachhaltige Batterien ein wesentlicher Stützpfeiler, da sie u. a. zur Dekarbonisierung des Verkehrs (vgl. Kapitel 2.1.1) und zur besseren Nutzbarkeit von erneuerbaren Energien beitragen.

Im Rahmen des europäischen Green Deals sollen die Ziele des strategischen Aktionsplans⁵⁹ für Batterien weiter umgesetzt und der Aufbau neuer innovativer Wertschöpfungsketten gefördert werden. Ein wesentliches Ziel des strategischen Aktionsplans für Batterien ist der Aufbau und die Stärkung von international führenden Industrietechnologien durch erhöhte Forschungs- und Innovationsausgaben. Durch innovative Projekte soll eine wettbewerbsfähige und hochskalierte Batteriezellfertigung aufgebaut werden, die gestützt durch eine eng vernetzte Wertschöpfungskette ein nachhaltiges europäisches Batterie-Ökosystem bildet.

Der Anspruch, bis 2050 klimaneutral zu sein, und die damit verbundenen notwendigen technologischen Innovationen tragen dazu bei, dass Europa neue Impulse setzt und den Vorsprung der etablierten Batteriezellproduzenten aufholen kann.

54 NPM, 2019

55 Transport & Environment, 2021b

56 VDA, 2020

57 Europäische Kommission, 2019a

58 EU COM, 2019b

59 Europäische Kommission, 2018

Pan-europäische Kooperation ermöglicht die Entwicklung innovativer Batterietechnologien

Der Aufbau einer nachhaltigen Batterieproduktion und einer funktionierenden Wertschöpfungskette ist komplex und erfordert ein hohes Maß an Kooperation und Zusammenarbeit, um europäische Standortvorteile nutzbar zu machen. Skandinavien bietet beispielsweise durch Raffinerien und teilweise eigene Vorkommen Zugang zu Rohstoffen. Die starke Automobilindustrie u. a. in Deutschland, Frankreich oder Spanien stellt potenziell einen starken Absatzmarkt für die in Europa gefertigten Batterien dar. Kurze Transportwege zwischen Standorten minimieren logistische und wirtschaftliche Risiken (vgl. Kapitel 2.5). Für den Aufbau neuer Lieferketten gilt es daher, nicht nur vorhandene Standorte zu qualifizieren, sondern insbesondere auch neue Standorte aufzubauen und zu verbinden.

Zur Erleichterung von Kooperationen und Stärkung der Zusammenarbeit wurde 2017 die europäische Batterieallianz (European Battery Alliance, EBA) ins Leben gerufen. Die EBA verbindet Akteure aus Wissenschaft, Industrie und Politik mit dem Ziel, eine nachhaltige und wettbewerbsfähige Batteriewertschöpfungskette in Europa aufzubauen und zu etablieren. Unter Federführung des europäischen Instituts für Innovation und Technologie InnoEnergy (European Institute of Innovation and Technology InnoEnergy, EIT InnoEnergy) und Einbeziehung von mehr als 120 Akteuren entlang der gesamten Wertschöpfungskette, wurden 43 Maßnahmen identifiziert, die für den Aufbau einer europäischen Batteriewertschöpfungskette notwendig sind. Davon wurden 18 Maßnahmen als besonders wichtig hervorgehoben, die die Grundlage für den strategischen Aktionsplan für Batterien bilden (siehe Infokasten auf Seite 21).

Die Aktivitäten der EBA werden durch weitere Initiativen ergänzt. Durch wichtige Vorhaben von gemeinsamem europäischem Interesse (Important Projects of Common European Interest, IPCEI) wird gezielt die Forschung, Entwicklung und Innovation entlang der gesamten Batteriewertschöpfungskette gefördert. Neben dem IPCEI on Batteries unter französischer Koordination wird das IPCEI „Europäische Batterie-Innovation“ (European Battery Innovation, EuBatIn) unter deutscher Koordination umgesetzt. In beiden IPCEI-Vorhaben entwickeln Unternehmen unter Beteiligung weiterer Akteure fortschrittliche Lösungen zum Aufbau einer pan-

europäischen nachhaltigen Batteriewertschöpfung (vgl. Kapitel 2.2.2). Abbildung 4 gibt einen Überblick über die durch die beiden IPCEI geförderten Teilnehmenden und die Standorte an denen die Vorhaben umgesetzt werden.

Batteries Europe mit der europäischen Technologie- und Innovationsplattform für Batterien (European Technology and Innovation Platform, ETIP) koordiniert und implementiert unter anderem Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten entlang der Batteriewertschöpfungskette. Durch sechs thematische Arbeitsgruppen werden Herausforderungen gezielt identifiziert und passende Lösungsstrategien entwickelt.

Die europäische Rohstoff-Allianz (European Raw Material Alliance, ERMA) hat zum Ziel, die Versorgung Europas mit kritischen und strategischen Rohstoffen sicherzustellen. Dies kann z. B. durch eine Diversifizierung der Bezugsquellen aus Drittländern, eine Stärkung des europäischen Bergbaus oder die Förderung von geschlossenen Materialkreisläufen erreicht werden.

Die Battery 2030+ ist eine Initiative, die ergänzend zu den kurz- und mittelfristigen Maßnahmen die mittel- bis langfristige Forschung und Entwicklung an neuen Batterietechnologien koordinieren und vorantreiben möchte. In dieser Initiative sind insbesondere Forschungseinrichtungen vertreten, da hier vor allem grundlegende Forschungsfragen beantwortet werden sollen. Eine Übersicht über ausgewählte europäische Initiativen deren Zweck und bisherige Ergebnisse ist in Abbildung 5 gezeigt.

Kooperationen steigern Effizienz, ermöglichen gemeinsames Lernen und stellen die Nachhaltigkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette sicher

Direkte Kooperationen zwischen Unternehmen beschleunigen den Aufbau der Batteriewertschöpfungskette, da sie den Aufbau von Wissen vereinfachen, die Vernetzung entlang der Lieferkette vorantreiben und Kosten senken können.

Im Bereich des Recyclings gibt es zum Beispiel eine strategische Kooperation zwischen BASF, Fortum und Nornickel.⁶⁰ Im Rahmen dieser Kooperation wird Fortum das Recycling der Altbatterien, Nornickel die Raffination und BASF die Herstellung von Vormaterial für die Kathodenherstellung übernehmen. Alle drei Partner verfügen über Produktionsanlagen im

finnischen Harjavalta, so dass die Transportwege kurz gehalten werden können. Im Bereich Maschinenbau gibt es eine Kooperation zwischen Grob Werke und Manz.⁶¹ Hier bringen die beiden Partner ein unterschiedliches Produktportfolio in die Partnerschaft ein und können so vollintegrierte Lösungen von der Zellfertigung bis zur Batteriesystemmontage aus einer Hand anbieten. Ein drittes Beispiel ist die Kooperation zwischen CATL und Hoppecke.⁶² Dank dieser Kooperation muss CATL kein eigenständiges Servicenetzwerk in Eu-

ropa aufbauen, sondern kann auf das bereits existierende europäische Servicenetzwerk des Mittelständlers Hoppecke zurückgreifen. Dieser übernimmt Prüfung, Reparatur und Austausch von Lithium-Ionen-Batterien in kommerziellen Elektrofahrzeugen. Eine weitreichende Kooperation von der Materialherstellung über die Zellfertigung und die Produktintegration bis zum Recycling gibt es zwischen Umicore, Northvolt und BMW. Ziel dieser pan-europäischen Koope-

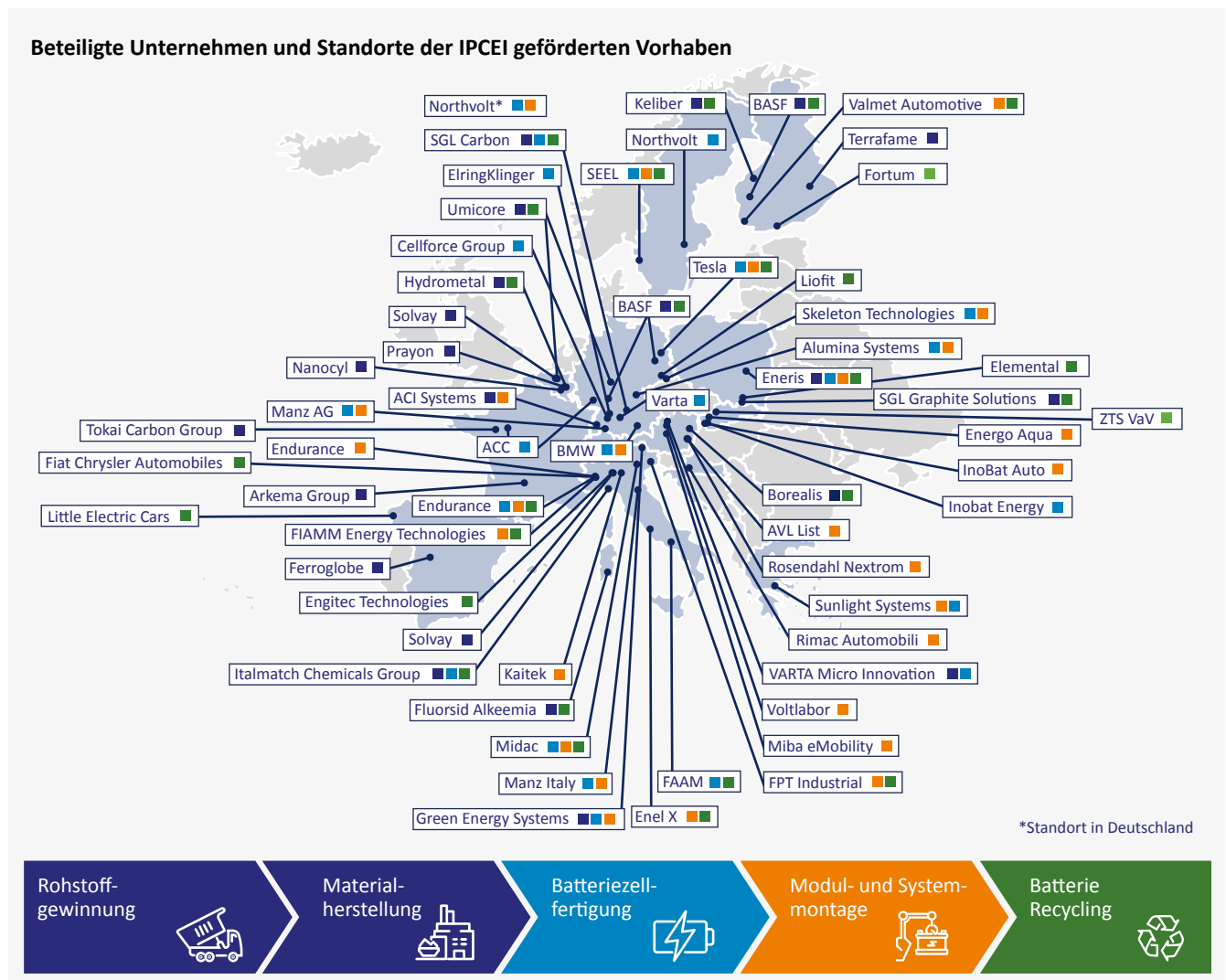


Abbildung 4: Teilnehmende und Standorte der durch das IPCEI on Batteries und IPCEI EuBatIn geförderten Vorhaben. Die Farben hinter den Unternehmen geben an, welche Wertschöpfungsstufen die Vorhaben adressieren. Eigene Darstellung.

61 Bönninghausen, 2021

62 Werwitzke, 2020b

18 prioritäre Maßnahmen zum Aufbau einer europäischen Batteriewertschöpfungskette

Gesicherter Zugang zu nachhaltig produzierten Batterierohstoffen zu angemessenen Kosten

1. Sicherung des Zugangs zu Rohstoffen aus ressourcenreichen Ländern außerhalb der EU.
2. Erleichterung der Erweiterung/Erschließung europäischer Rohstoffquellen.
3. Sicherung des Zugangs zu Sekundärrohstoffen durch Recycling in einer Batterie-Kreislaufwirtschaft.

Europa zum Weltmarktführer für nachhaltige Batterietechnologie machen

4. Unterstützung des Wachstums einer zellproduzierenden Industrie mit dem kleinstmöglichen ökologischen Fußabdruck. Dies wird einen entscheidenden Wettbewerbs- und Handelsvorteil gegenüber Konkurrenten darstellen.
5. Ein wertschöpfungskettenübergreifendes Ökosystem für Batterien schaffen und erhalten. Dies umfasst Abbau, Verarbeitung, Materialdesign, Second-Life und Recycling innerhalb der EU, wobei sektorübergreifende Initiativen zwischen Wissenschaft, Forschung, Industrie, Politik und Finanzwelt gefördert werden.

Unterstützung der europäischen Batterieproduktion, um das erwartete massive Wachstum der Marktnachfrage (250 Mrd. Euro pro Jahr im Jahr 2025) nicht zu verpassen

6. Sicherstellung der Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigen und leistungsstarken Zellen für die europäische Industrie, um die Wettbewerbsfähigkeit verschiedener europäischer Industrien zu erhalten.
7. Finanzielle Vorleistungen, z. B. IPCEI (Important Projects of Common European Interest) und/oder andere Finanzinstrumente wie steuerliche Anreize, sind ein Muss, um für den Nachfrageanstieg gerüstet zu sein.
8. Beschleunigung des Prozesses und Verkürzung der Zeit bis zur Marktreife, um die Marktnachfrage zu befriedigen und die internationalen Wettbewerber zu übertreffen.

Neue Märkte für Batterien schaffen und unterstützen, z. B. durch die Pakete „Saubere Energie“ & „Mobilität“. Dazu gehören auch neue Initiativen, um nachhaltige Lösungen für die Bereiche Energie, Transport und Industrie im Einklang mit den EU-Klimazielen zu unterstützen.

9. Steigerung der Nachfrage nach E-Mobilitätslösungen einschließlich Nutzfahrzeuge.
10. Die Funktion von Batterien und Batteriesystemen muss als multifunktional betrachtet werden, sowohl im Kontext des Strom- als auch des Transportsektors. Für Energiespeichersysteme (ESS) ist eine Regulierung (oder das Fehlen einer Regulierung), die die richtigen Geschäftsmodelle ermöglicht, entscheidend.
11. Anreize schaffen, um Speicher zu einer Alternative zur konventionellen Netzverstärkung zu machen.
12. Ermöglichung der Integration von ESS auf allen Ebenen des Stromnetzes, auch hinter dem Zähler.

Europas Forschungs- & Innovations-(F&I)-Kapazitäten ausbauen. Aufbau und Stärkung von qualifizierten Arbeitskräften in allen Teilen der Wertschöpfungskette und Steigerung der Attraktivität Europas für weltweit führende Experten.

13. Schaffung eines Wettbewerbsvorteils durch kontinuierliche inkrementelle (z. B. Lithium-Ionen) und disruptive (z. B. Solid State) F&I, die mit dem industriellen Ökosystem verbunden ist. Dies gilt für alle Teile der Wertschöpfungskette (fortschrittliche Materialien, neue chemische Zusammensetzungen, fortschrittliche Herstellungsprozesse, Batterie-Managementsysteme (BMS), Recycling, Geschäftsmodellinnovationen).
14. Durchführung fortschrittlicher Forschung in den Bereichen Batteriechemie, Batteriesysteme, Herstellung und Recycling. Erhöhung des Outputs der Universitäten in diesen Bereichen durch die Einbindung der Industrie.
15. Mit Leuchtturmprojekten für die Zellfertigung weltweit Talente anlocken. Dies ist notwendig, da es in Europa an Humankapital mit hinreichenden und wichtigen Fähigkeiten mangelt, insbesondere im Bereich des angewandten Prozessdesigns.

16. Steigerung der Attraktivität Europas für Expert:innen von Weltrang und Entwicklung kompetenter Arbeitskräfte.

Die EU-Bürger:innen in die Reise einbeziehen: informieren, aufklären und motivieren

17. Am Ende der Lieferkette steht immer eine B2C-Transaktion. Öffentliche Anstrengungen (Bildung in Schulen, Vorbilder usw.) sollten zur Bewusstseinsbildung und zum Verständnis der Bevölkerung für die gesamte Wertschöpfungskette aufgewendet werden, damit von Anfang an eine relevante gesellschaftliche Aneignung stattfindet. Der Wettstreit für den Erhalt der Wert-

schöpfungskette in Europa wird definitiv dazu beitragen, die Kluft zwischen den EU-Bürger:innen und den Politiker:innen zu überbrücken.

Maximale Sicherheit für die europäischen Bürger:innen gewährleisten und einen Wettbewerbsvorteil durch Standardisierung schaffen

18. Standardisierung von speicherbezogenen Installationen und Sicherheitsvorschriften, einschließlich der Ladeinfrastruktur, des aktiven Lastausgleichs und der Ermöglichung von Vehicle-to-Grid-Lösungen.

ration ist es, eine nachhaltige Wertschöpfungskette mit geschlossenen Kreisläufen zu etablieren.⁶³

Als weitere Form der Kooperation gibt es Joint-Ventures (JV) zwischen Unternehmen. Die kooperierenden Unternehmen beteiligen sich in der Regel finanziell an dem JV und können so bei der Erschließung neuer Geschäftsfelder individuelle Kosten und Risiken senken. Im Bereich Batteriezellfertigung wurde zum Beispiel das JV Automotive Cells Company (ACC) zwischen PSA und Saft geschlossen. Während Saft Expertise im Bereich der Batterietechnologie zu diesem JV beiträgt, bringt PSA Expertise aus der Fahrzeugfertigung ein. Durch gemeinsame Forschungs- und Entwicklungszentren können Synergien genutzt, Kosten eingespart und anwendungsorientierte Batterien entwickelt werden. Basierend auf den Ergebnissen der Forschung und Entwicklung soll schließlich eine Batterieproduktion im GWh-Maßstab aufgebaut werden, die neben der PSA-Flotte auch weitere Hersteller mit Batterien versorgen könnte.⁶⁴ Ein weiteres Beispiel ist das JV Kion Battery Systems zwischen Kion und der BMZ Group, das gemeinsam Batteriesysteme für die Flurförderfahrzeuge von

Kion entwickelt.⁶⁵ Das JV hat eine eigene Produktionsstätte aufgebaut, durch die Produktionskapazitäten erhöht sowie die Produktpalette erweitert werden konnte. Ein vergleichbares JV hat sich mit der JT Energy Systems GmbH zwischen Jungheinrich AG und Triathlon Holding GmbH gebildet.⁶⁶

Im Bereich der Rohstoffgewinnung hat das JV zwischen Ganfeng Lithium und International Lithium Corporation (ILC) Lizenzen zum Abbau von Lithium in Irland erworben. Beide Unternehmen sind finanziell an dem JV beteiligt und teilen sich so die Kosten für die Machbarkeitsstudien zur Entwicklung dieses Projektes.⁶⁷

Durch neue Lieferbeziehungen wird das sich im Aufbau befindliche europäische Batterie-Ökosystem weiter gefestigt. Im Bereich der Batteriezellen hat zum Beispiel BMW einen langfristigen Liefervertrag mit Northvolt abgeschlossen. Durch diesen Liefervertrag kann BMW ab 2024 einen Teil des Batteriebedarfs decken. Daneben bezieht BMW Batterien von Samsung SDI, die ein Werk in Ungarn betreiben und von CATL, die ein Werk in Erfurt eröffnen werden.⁶⁸ Northvolt

63 Umicore, 2018

64 Schaal, 2020a

65 KION, 2020

66 Jungheinrich, 2019

67 ILC, 2018

68 Schaal, 2020b

wiederum hat weitere Lieferbeziehungen mit dem schwedischen Motorradhersteller Cake⁶⁹ oder Epiroc, einem schwedischen Hersteller von Bergbaumaschinen⁷⁰. Im Bereich Kathodenmaterial baut Umicore ein Werk im polnischen Nysa auf und wird daraus die polnische Zellfertigung von LG Chem (seit 2020 LG Energy Solutions)⁷¹ in Breslau beliefern. Neben der Belieferung mit Kathodenmaterial ist auch eine Zusammenarbeit im Bereich Recycling geplant.⁷² Im Bereich der Batteriekomponenten hat ElringKlinger einen langfristigen Liefervertrag über Zellkontaktersysteme mit einem global agierenden Zellhersteller, der aktuell ein Werk in Deutschland aufbaut, abgeschlossen.⁷³

Zur Sicherstellung einer nachhaltigen Wertschöpfung beteiligen sich Unternehmen an Initiativen, die sich diesem Thema widmen. Als Beispiele seien hier die Initiative for Responsible Mining Assurance (IRMA) oder die Responsible Minerals Initiative (RMI) genannt, die Interessensverbände und Unternehmen mit dem Ziel vereint, eine ökologisch und sozial

nachhaltige Rohstoffgewinnung zu gewährleisten. Ein weiteres Beispiel ist die Initiative Science Based Targets (SBT), die Unternehmen auffordert, CO₂ Ziele festzulegen und diese bei der Umsetzung der Zielvorgaben unterstützt. Als drittes Beispiel sei die Global Reporting Initiative (GRI) genannt, die Vorgaben und Standards für Nachhaltigkeitsberichte von Unternehmen entwickelt, um diese zu vereinheitlichen und eine einfachere Vergleichbarkeit zu gewährleisten. So können Stärken und Schwächen einfacher beurteilt und Verbesserungspotenziale identifiziert werden.

Die hier genannten Kooperationen und Initiativen geben eine exemplarische Übersicht über Aktivitäten in Europa und verdeutlichen, dass nicht nur eine Zellproduktion aufgebaut, sondern die gesamte Wertschöpfungskette berücksichtigt wird. Sie stellen nur einen kleinen Ausschnitt des aktuell sehr stark wachsenden europäischen Batterie-Ökosystems dar, das in einer separaten Studie detaillierter betrachtet wurde.⁷⁴

Europäische Initiativen					
	European Battery Alliance	Battery 2030+	BatterRies Europe	IPCEI on Batteries IPCEI EuBatIn	European Raw Material Alliance
Zweck	Vernetzung, Aufbau Batterie-Wertschöpfungskette	Koordination Grundlagen-Forschung	Koordination Angewandte Forschung	Aufbau Batterie-Wertschöpfungskette	Rohstoff-versorgung
Ergebnisse	43 Maßnahmen zur Etablierung der Batterie-Wertschöpfungskette	Battery 2030+ Manifesto	BatterRies Europe Strategic Research Agenda	F&E zum Aufbau einer nachhaltigen Batterie-Wertschöpfung	Cluster on Materials for Energy Storage and Conversion
	Business Investment Platform	Battery 2030+ Roadmap	Raw Materials And Recycling Roadmap		

Abbildung 5: Europäische Initiativen zur Etablierung eines nachhaltigen Batterie-Ökosystems und deren Maßnahmen. Eigene Darstellung.

69 Schaal, 2020c

70 Schaal, 2020d

71 Schaal, 2020e

72 Bönninghausen, 2019

73 Werwitzke, 2021

74 Gieschen et al., 2021

2.2.2 Eine dezidierte öffentliche Förderung der Batteriezellfertigung ist entscheidend für den nachhaltigen Aufbau eines europäischen Batterie-Ökosystems

- Der **Staat** hat **aus innovationspolitischer Sicht** eine **entscheidende Rolle**.
- Staatliche Unterstützung kann aufgrund von „**Kapitalmarktversagen**“ nötig sein.
- Das **Aufschließen zu den asiatischen Wettbewerbern** kann **durch gezielte Förderung** von Innovationen in der europäischen Batteriewertschöpfungskette erleichtert werden.
- Die Förderung der Elektromobilität / Batteriezellfertigung stellt **keine Abkehr vom Prinzip der Technologieoffenheit** dar.

Aus den Herausforderungen eines effektiven Klimaschutzes leitet sich die Aufgabe des Staates ab, den **industriellen Strukturwandel** zu ermöglichen. Ob dies über Preissignale und Innovationsförderung, also den Instrumenten einer **horizontalen Industriepolitik**, oder über technologische Regulierung bis hin zu staatlich organisierten Investitionen in Produktionsanlagen, also einer stärker **intervenierenden Industriepolitik**, geschehen soll, ist Teil einer ausführlichen klima- und industriepolitischen Debatte.⁷⁵

Grundsätzlich hat der Staat aus innovationspolitischer Sicht eine entscheidende Rolle. Denn er trägt eine große Verantwortung dafür, den nötigen Strukturwandel zu ermöglichen und insbesondere dort aktiv anzuregen, wo Marktkräfte dafür nicht ausreichen.⁷⁶

Es sind vor allem drei Argumente, mit denen ein industrie- und innovationspolitisches Handeln des Staates gerechtfertigt werden kann:

- Unsicherheit, die sich von Risiko dadurch unterscheidet, dass keine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die möglichen Ergebnisse bekannt ist,

- Netzwerkeffekte und Externalitäten, die ein koordiniertes Handeln von privaten und staatlichen Akteuren erfordern,
- Pfadabhängigkeiten, die sich vor allem im Bereich des Energiesektors aus hohen Fixkosten und der langen Lebensdauer von Investitionen ergeben.

Staatliche Unterstützung bei Marktversagen

Laut Bofinger kann aus strategischer Sicht ein industrie- und innovationspolitisches Handeln auch dann geboten sein, wenn in anderen wirtschaftlich bedeutsamen Ländern eine aktive Industriepolitik betrieben wird, die im globalen Wettbewerb zu Nachteilen für die heimischen Anbieter führen kann.⁷⁷

„Das Problem der Unsicherheit oder zumindest sehr hoher Risiken kann bewirken, dass private Akteure von innovativen Investitionen Abstand nehmen, obwohl sie diese bezogen auf ihre Ertragspotenziale nicht grundsätzlich negativ einschätzen. Dieser Sachverhalt wird oftmals unter den Begriff des Kapitalmarktversagens gefasst“ (Bofinger 2019).⁷⁸

Durch die hohe Marktpräsenz der asiatischen Zellhersteller und die erforderlichen erheblichen Investitionen herrschen hohe Markteintrittsbarrieren für neue (europäische) Wettbewerber.

Das Aufschließen zu asiatischen Wettbewerbern wird durch gezielte Förderung erleichtert

Grundsätzlich kann die Herausforderung, den Vorsprung der asiatischen und insbesondere der chinesischen Hersteller aufzuholen, gemäß Bofinger nur durch gemeinsame europäische Anstrengungen erfolgreich angenommen werden. „Nur wenn Europa geschlossen auftritt, besteht die Chance, die Größenvorteile zu entfalten, die sich derzeit für Investoren und Innovatoren auf dem asiatischen/chinesischen Markt bieten“ (Bofinger 2019).

Ein Lösungsansatz in diesem Zusammenhang ist die Bestrebung der Europäischen Kommission und der deutschen Bundesregierung, über eine Europäische Batterie-Allianz eine

75 Bardt, 2019

76 Schmidt, 2019

77 Bofinger, 2019

78 Siehe dazu auch: Chang et al., 2013

eigene Fertigung von Batteriezellen zu fördern.⁷⁹ Dazu haben Anfang 2019 zahlreiche EU-Mitgliedstaaten unter Federführung Frankreichs und Deutschlands zusammen mit der Europäischen Kommission zwei Großprojekte, so genannte Important Projects of Common European Interest (IPCEI), zur Forschung und Entwicklung in der Batteriezellfertigung beschlossen. Die beiden IPCEIs wurden nach Prüfung der beihilferechtlichen Konformität Ende 2019 und Anfang 2021 jeweils von der EU-Kommission genehmigt und umfassen allein in Bezug auf die EU-Mitgliedstaaten Fördergelder in Höhe von über 6 Mrd. Euro (bis zu 3 Mrd. Euro stellt die deutschen Bundesregierung bereit). Hinzu kommen Gelder aus den Regionen, in denen die geförderten Projekte angesiedelt sein werden, sowie Investitionen der Industrie. Allein in Deutschland werden dadurch Investitionen von über 13 Mrd. Euro angestoßen, infolge dessen in den nächsten Jahren mehrere tausend und bis zum Ende dieses Jahrzehnts mehrere zehntausend qualifizierte Arbeitsplätze entstehen.^{80 81 82}

Batterie IPCEIs – Kritiker und Befürworter einer interventionistischen Industriepolitik

Für die interventionistische Industriepolitik in Form der beiden Batterie IPCEIs finden sich sowohl Kritiker als auch Fürsprecher.

Der Sachverständigenrat der Bundesregierung kommt zu einer **eher kritischen Einschätzung** der Batterie-Förderung: Die Subventionierung der Produktion von Batteriezellen selbst erscheine demnach nicht zielführend. „Die Herstellung ist kapital- und energieintensiv. Ein Großteil der Wertschöpfung liegt in den Ressourcen und die Herstellung ist zu großen Teilen automatisiert. Die Beschäftigungseffekte dürften deshalb womöglich nur gering sein.“⁸³ Zwar konzentrieren sich die führenden Produzenten von Batteriezellen in Asien, der Wettbewerb zwischen den Anbietern scheint aber zu funktionieren.⁸⁴ Das lässt vermuten, dass die Einkaufspreise

für Batterien Wettbewerbspreise sein dürften und deshalb die Wettbewerbsfähigkeit von europäischen oder nationalen Automobilherstellern nicht gefährden“.⁸⁵

Die grundlegende Kritik äußert sich darin, dass Produktionssubventionen mit vielen Problemen behaftet sind: So bergen beispielsweise Förderzusagen trotz mangelnder Informationslage auf Seiten des Staates oder aufgrund bestimmter politischer Präferenzen die Gefahr politischer Einflussnahme⁸⁶ und eine Subvention für die Batteriezellenproduktion setze verschiedene Fehlanreize.⁸⁷

Dieser kritischen Stimme lassen sich jedoch zahlreiche **Argumente der Befürworter der beiden Batterie-IPCEIs** gegenüberstellen: Neben der Mobilisierung von erheblichen privaten Investitionen und der damit verbundenen Schaffung einer Vielzahl qualifizierter Arbeitsplätze begründet die EU-Kommission die beihilferechtliche Genehmigung der IPCEI v. a. damit, dass sie zu einem gemeinsamen Ziel beitragen. Insbesondere da es eine Wertschöpfungskette betrifft, die für die Zukunft Europas, vor allem mit Blick auf saubere und emissionsarme Mobilität, von strategischer Bedeutung ist. Gleichzeitig werden die IPCEIs als sehr ehrgeizig eingestuft, da sie auf die Entwicklung von Technologien und Verfahren abzielen, die deutlich über den aktuellen Stand der Technik hinausgehen und große Verbesserungen hinsichtlich Leistung, Sicherheit und Umweltschutz ermöglichen werden. Da die im Rahmen der IPCEIs geförderten Projekte auch erhebliche technologische und finanzielle Risiken bergen, wird eine öffentliche Förderung als erforderlich angesehen – auch, um Investitionsanreize für Unternehmen zu schaffen. Beihilfen für einzelne Unternehmen sind auf das notwendige Maß beschränkt und dürfen den Wettbewerb nicht übermäßig verfälschen. Die Kommission hat sich diesbezüglich insbesondere vergewissert, dass die geplanten Beihilfemaximale den Finanzierungslücken, bezogen auf die beihilfefähigen

79 Bofinger, 2019

80 BMWi, 2021d

81 Frese, 2021

82 BMWi, 2021a

83 Falck & Koenen, 2019

84 Falck & Koenen, 2019

85 Sachverständigenrat, 2020

86 Sachverständigenrat, 2019

87 Sachverständigenrat, 2020

gen Kosten der Vorhaben, entsprechen. Die Unternehmen werden außerdem einen Teil der erhaltenen Steuergelder an die betreffenden Mitgliedstaaten zurückzahlen, wenn ihr IPCEI-Vorhaben sehr erfolgreich ist und Nettoerträge erwirtschaftet werden. Gefördert werden zudem nur Projekte, an denen mehrere Mitgliedstaaten beteiligt sind, die private Investitionen durch die Begünstigten einbeziehen und die positive Spill-Over-Effekte in der gesamten EU erzielen. Folglich profitieren auch Staaten bzw. dort ansässige Unternehmen, die nicht an den IPCEIs partizipieren, da die Ergebnisse der Vorhaben an die europäische Wissenschaftsgemeinschaft und viele andere Unternehmen auch aus anderen Ländern weitergegeben werden (Spill-Over).

Darüber hinaus decken die Förderprojekte der beiden Batterie-IPCEIs die gesamte Batteriewertschöpfungskette ab – von der Gewinnung der Rohstoffe, der Konzeption und Fertigung von Batteriezellen und Batteriesystemen bis hin zum Recycling und zur Entsorgung in einer Kreislaufwirtschaft, wobei der Fokus immer auch auf der Nachhaltigkeit liegt. Die geförderten Vorhaben sollen zu einer ganzen Reihe neuer technologischer Durchbrüche beitragen, die verschiedene Zellchemien und neuartige Produktionsverfahren sowie weitere Innovationen in der Batteriewertschöpfungskette umfassen.

In beiden IPCEIs zusammen summiert sich die Zahl der direkten Teilnehmer auf 59 und die Kooperationen mit externen Partnern auf über 220. Damit lässt sich eine breite Vernetzung der Akteure über Wertschöpfungsstufen und damit ein Wissenstransfer, insbesondere zwischen Batteriezell- und Materialherstellern, sowie ein Technologietransfer zwischen den beteiligten Industriezweigen und der Forschung realisieren bzw. intensivieren. Auf diese Weise können die Beteiligten dazu beitragen, die bereits vorhandenen Stärken in erfolgreiche Produkte umzusetzen.^{88 89}

Auch **auf Seiten der Industrie wird** das Instrument des **IPCEI** für die Erprobung, Markteinführung und Skalierung von innovativen Technologien in von Marktversagen betroffenen

Branchen bzw. Märkten **positiv bewertet**, da hierdurch die technologische Souveränität gestärkt und in Bezug auf die Batteriezellfertigung die Verfügbarkeit von Batteriekomponenten sichergestellt und zukunftsfähige Arbeitsplätze geschaffen würden. So betonte bspw. BASF, ein im Rahmen des ersten Batterie-IPCEI gefördertes Unternehmen, dass die mit der Förderung verbundene eigene Investition eine klare Bekräftigung für eine europäische Wertschöpfungskette der Batterieproduktion darstelle.⁹⁰ Auch BMW ist mit Forschungs- und Entwicklungsprojekten an den Batterie-IPCEIs beteiligt und entwickelt innovative, nachhaltige, funktionsoptimierte und kosteneffiziente Batteriezellen, die laut BMW ein Schlüsselement einer europäischen Zell- und Batteriewertschöpfungskette anzusehen sind. Nach Aussagen des Unternehmens stärken die erzielten Forschungsergebnisse im Rahmen der IPCEI-Vorhaben den Aufbau einer integrierten europäischen Batteriewertschöpfungskette und ebnen den Weg für eine erfolgreiche Batteriezellentwicklung und -produktion in Europa.⁹¹ Aus Sicht der BMW-Gruppe (Peter Lamp, Leiter Forschung und Entwicklung Batteriezele und Brennstoffzelle) sind die wichtigsten Ziele der Batterie-IPCEIs die Reduzierung der geopolitischen Abhängigkeit im Batteriezellenmarkt sowie der Aufbau eines europäischen Partnernetzes für Batteriezellen.⁹²

Förderung der Batteriezellfertigung ist keine Abkehr von der Technologieoffenheit

In Bezug auf die Förderung der Elektromobilität und der Batteriezellfertigung, sind vereinzelt Stimmen zu hören, die darin eine Abkehr vom **Prinzip der Technologieoffenheit** sehen.

So könne eine noch so gut informierte Regierung nicht wissen, welches Marktergebnis in einem innovativen Prozess möglich ist und welches Unternehmen dies bestmöglich erreichen kann. „Picking the Winners“, also die Auswahl und Förderung eines bestimmten Unternehmens oder einer bestimmten Technologie, schaltet den Wettbewerb aus, behindert die notwendigen Innovationen und ist insofern keine überzeugende Antwort auf die Dynamiken der anstehenden

88 Europäische Kommission, 2021b

89 Europäische Kommission, 2019c

90 BASF, 2020

91 BMW, 2021

92 Günnel, 2020

grundlegenden Veränderungsprozesse.⁹³ Zudem sei unklar, ob sich das batterieelektrische Fahrzeug als führende Technologie nachhaltig durchsetzen können wird. Langfristig sei für mehrere Fahrzeugsegmente mit der Brennstoffzelle statt der Batterie zu rechnen.⁹⁴ Auch der VDA hat sich stets für eine Technologieoffenheit ausgesprochen bzw. die Festlegung auf nur eine emissionsarme Antriebsart abgelehnt und darauf beharrt, dass sowohl batterieelektrische Fahrzeuge als auch die Brennstoffzellentechnologie und synthetische Kraftstoffe mögliche Dekarbonisierungsoptionen darstellen.⁹⁵

Kritiker:innen betonen, dass das Konzept der Technologieoffenheit letztendlich zu einer Verfestigung des Status quo führe und sich ohne Festlegungen keine Veränderungsprozesse forcieren lassen. Entsprechend äußerte sich etwa VW-Chef Diess in einer Kritik am VDA und forderte, der Verband solle sich eindeutig zu batterieelektrischen Autos als Zukunftstechnologie positionieren.⁹⁶ Dies käme einer Zäsur gleich und könnte eine dynamische Erneuerung der Automobilhersteller zumindest im Hinblick auf die Antriebstechnologie einläuten. Gleichwohl hat die Plattform Zukunft der Mobilität synthetische Kraftstoffe als möglichen Baustein einer Dekarbonisierung des Autoverkehrs benannt. Insofern ist nicht abzusehen, ob sich die Automobilindustrie geschlossen vom Konzept der Technologieoffenheit verabschieden wird.⁹⁷

Dass seitens der Politik bzw. politischer Entscheidungsträger:innen keine Abkehr vom Prinzip der Technologieoffenheit stattfindet, zeigt sich in Bezug auf die notwendige ökologische/nachhaltige Transformation des Verkehrssektors insbesondere daran, dass mit dem Ziel der weitgehenden Treibhausgasneutralität des Verkehrssektors neben der Förderung der Batteriezellfertigung auch weitere alternative Antriebsarten bzw. -konzepte eine breite und zunehmende Berücksichtigung in den deutschen und europäischen Förderstrategien und -programmen finden.

Dies trifft insbesondere auf den Energieträger Wasserstoff zu. Insbesondere hinsichtlich des finanziellen Volumens erreicht die Förderung von Wasserstoff ein ähnliches, wenn nicht gar höheres, als die Batteriezellfertigung: So steht zum Beispiel im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) im Zeitraum 2016 bis 2026 ein Fördervolumen von bis zu 1,4 Mrd. Euro zur Verfügung. Zudem wird die anwendungsorientierte Grundlagenforschung zu grünem Wasserstoff im Rahmen des Energie- und Klimafonds von 2020 bis 2023 mit 310 Mio. Euro weiter ausgebaut und es ist beabsichtigt, die anwendungsnahe Energieforschung zu Wasserstofftechnologien mit 200 Mio. Euro von 2020 bis 2023 zu stärken. Hinzu kommen die „Reallabore der Energiewende“, welche den Technologie- und Innovationstransfer von der Forschung in die Anwendung auch bei Wasserstoff beschleunigen und für die im Zeitraum von 2020 bis 2023 Mittel in Höhe von 600 Mio. Euro vorgesehen sind. Im Rahmen des Nationalen Dekarbonisierungsprogramms werden unter anderem Investitionen in Technologien und großtechnische Anlagen in der Industrie gefördert, die Wasserstoff zur Dekarbonisierung von Herstellungsverfahren einsetzen. Hierfür stehen von 2020 bis 2023 über 1 Mrd. Euro zur Verfügung. Zusätzlich sieht das coronabedingte Konjunkturprogramm der deutschen Bundesregierung von Juni 2020 vor, dass weitere 7 Mrd. Euro für den Markthochlauf von Wasserstofftechnologien in Deutschland und weitere 2 Mrd. Euro für internationale Wasserstoff-Partnerschaften bereitgestellt werden.⁹⁸

Darüber hinaus setzt auch die europäische Ebene verstärkt auf den Energieträger Wasserstoff. Mit der am 8. Juli 2020 vorgelegten Europäischen Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa soll v. a. der Grundstein für den Aufbau einer grünen Wasserstoffinfrastruktur in Europa gelegt werden. Grüner Wasserstoff soll mithilfe von EU-Geldern bis 2030 wettbewerbsfähig werden und die Energiewende voranbringen.⁹⁹ Unterstützt werden soll dies mit einem IPCEI, das – federführend durch die deutsche Bundesregierung –

93 Bardt, 2019

94 NM, 2021

95 Haas, 2020

96 Mortsiefer, 2019

97 Haas & Jürgens, 2019

98 BMWi, 2020b

99 Future:fuels, 2020; Europäische Kommission, 2020f

Projekte entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Erzeugung grünen Wasserstoffs über Infrastruktur bis zur Nutzung von Wasserstoff in der Industrie und Mobilität ermöglichen soll. Insgesamt sollen hierfür mehrere Milliarden Euro aus dem Konjunkturpaket der Bundesregierung und Landesmitteln zur Verfügung gestellt werden.¹⁰⁰ Darüber hinaus haben bereits 22 EU-Mitgliedstaaten und Norwegen eine Absichtserklärung unterzeichnet, mit der sie ihre Bereitschaft zur Unterstützung der Entwicklung einer europäischen Wertschöpfungskette für insbesondere grünen Wasserstoff und zu entsprechenden Investitionen in Milliardenhöhe erklären. Das Bekenntnis zu Wasserstoff als Zukunftstechnologie bezeichnen die beteiligten Länder als maßgeblich, um Europa bis 2050 zum klimaneutralen Kontinent zu machen.¹⁰¹ Das BMWi und das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), zusammen mit den Bundesländern haben derweil mittels eines Bewerbungsverfahrens allein 62 Projekte in Deutschland vorausgewählt die im Rahmen eines solchen Wasserstoff-IPCEIs mit bis zu acht Milliarden Euro gefördert werden sollen.¹⁰²

2.3 Kreislaufwirtschaft

- Der aktuelle Entwurf einer **europäischen Batterieverordnung** legt ein umfangreiches Maßnahmenpaket zur **Etablierung einer Kreislaufwirtschaft** vor.
- Die steigende Anzahl an Altbatterien und die damit verbundene Möglichkeit zur **Automatisierung** und **Effizienzsteigerung** sind wesentliche Hebel zur **Steigerung der Wirtschaftlichkeit** von Recyclingprozessen. Die aktuell in Fahrzeugen eingesetzten Batteriepacks werden voraussichtlich in etwa acht bis 15 Jahren ihr Lebensende erreichen. Dieses Zeitfenster gilt es zu nutzen, um vorhandene Anlagen technologisch weiter aufzurüsten und neue Recyclingkapazitäten aufzubauen.
- Die Aufbereitung und **Wiederverwendung von Altbatterien** verbessert den ökologischen Fußabdruck von Batterien. Aufgrund der aktuell sehr

hohen Marktdynamik und fallender Batteriepreise ist die wirtschaftliche Etablierung von Second-Life-Geschäftsfeldern herausfordernd. Geeignete Rahmenbedingungen wie Design-Richtlinien oder Richtlinien zur Batteriedatenverfügbarkeit können einen Beitrag zur Kostensenkung leisten.

2.3.1 Politische Vorgaben und der Ausbau von Produktionskapazitäten ermöglichen die Kreislaufführung von Batterien

Politische Vorgaben schaffen die Rahmenbedingungen zur Etablierung einer Batteriekreislaufwirtschaft

Politische Vorgaben z. B. in Form von Verordnungen oder Gesetzen sind ein wirksames Mittel zur Etablierung und Gestaltung einer Batteriekreislaufwirtschaft. Das Gesetz *über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Batterien und Akkumulatoren (Batteriegesetz)* setzt die europäische Richtlinie über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Alttakkumulatoren (2006/66/EG) in deutsches Recht um und gibt z. B. Sammelquoten für Altbatterien vor oder regelt die Umsetzung von Rücknahmesystemen für Altbatterien.

Zur Erweiterung der rechtlichen Rahmenbedingungen befindet sich die europäische Batterierichtlinie 2006/66/EG aktuell in Revision. In Form einer neuen europäischen Batterieverordnung soll durch die Novellierung ein rechtlicher Rahmen geschaffen werden, der nicht nur den Umgang mit Altbatterien umfassender regelt, sondern zusätzlich die Herstellung und Nutzungsphase von Batterien umschließt.¹⁰³ Dieser rechtliche Rahmen soll Planungssicherheit geben und den **Aufbau sowie die Etablierung neuer Geschäftsfelder im Bereich der Batteriekreislaufwirtschaft** ermöglichen.

Der aktuelle Entwurf der überarbeiteten europäischen Batterieverordnung (BattVO-E) wurde am 10. Dezember 2020 veröffentlicht und zeigt in mehreren Artikeln Maßnahmen auf, die der Etablierung einer Batterie-Kreislaufwirtschaft dienlich sind. Einige der förderlichsten Maßnahmen werden

¹⁰⁰ BMWi, 2021e

¹⁰¹ Werwitzke, 2020c

¹⁰² Schaal, 2021b

¹⁰³ Europäische Kommission, 2020e

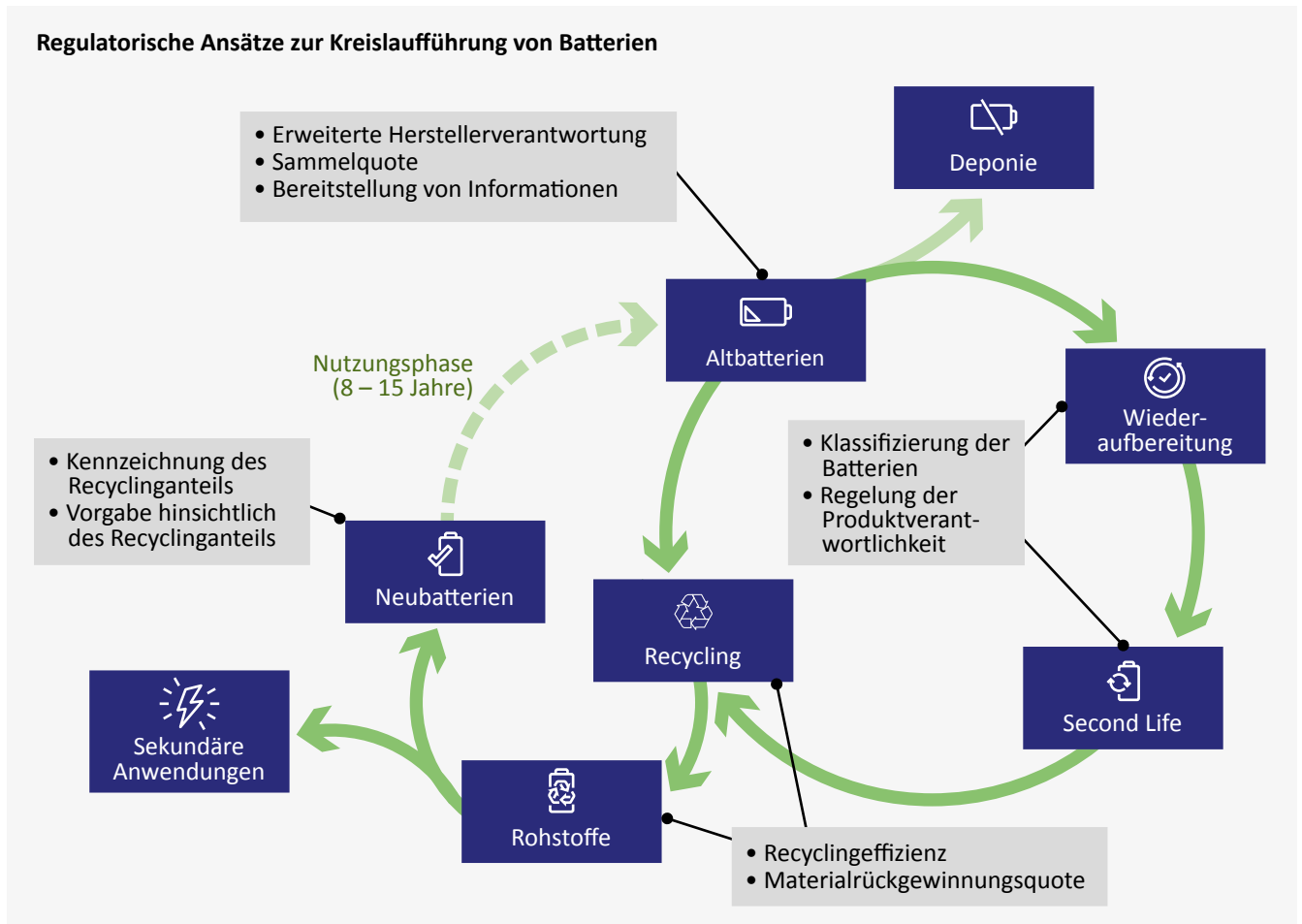


Abbildung 6: Mögliche Pfade für die Verwertung von Altbatterien. Die dunkelgrau unterlegten Kästchen zeigen die regulatorischen Ansätze zur Stärkung einer Batterie-Kreislaufwirtschaft. Eigene Darstellung.

in Abbildung 6 in Form von dunkelgrau hinterlegten Kästchen aufgegriffen. Die Darstellung visualisiert zum einen die möglichen Pfade zur Verwertung von Altbatterien, zum anderen verdeutlicht sie, an welcher Stelle der Kreislaufführung die Maßnahmen greifen würden.

Die **erweiterte Herstellerverantwortung** nimmt die Hersteller von Batterien in die Pflicht, die Sammlung und Behandlung von Altbatterien zu organisieren und zu finanzieren. Die Deponierung von Altbatterien wird dabei untersagt. Sie legt somit einen wichtigen logistischen Grundstein, um die Kreislauffähigkeit von Batterien zu gewährleisten.

Durch die **Sammelquote** soll sichergestellt werden, dass möglichst viele Altbatterien im Kreislaufsystem verbleiben. Das seit Januar 2021 gültige Batteriegesezt gibt eine Sam-

melquote von 50% für Gerätebatterien vor. Der aktuelle Entwurf der europäischen Batterieverordnung sieht vor, die Sammelquote für Gerätebatterien ab 2025 auf 65% und ab 2030 auf 70% zu erhöhen. Für Altbatterien aus Elektrofahrzeugen wird eine 100%-Sammelquote vorgegeben.

Die **Bereitstellung von Informationen** gewährleistet, dass notwendige Informationen zur **Klassifizierung der Altbatterien** bereitstehen. Der aktuelle Entwurf sieht vor, dass zu diesen Informationen u. a. die chemische Zusammensetzung sowie Angaben zur Restkapazität gehören. Hierdurch sollen Entscheidungen vereinfacht werden, ob die Altbatterie für eine Wiederaufbereitung oder das Recycling in Frage kommt. Neben der Aufbringung einer Kennzeichnung auf den Batterien sollen die Informationen über einen per QR-

Code zugänglichen Batteriepass (vgl. Infokasten „Was ist ein Batteriepass“) elektronisch bereitgestellt werden.

Die **Regelung der Produktverantwortlichkeit für Second-Life-Batterien** verpflichtet die Aufbereitungsbetriebe, zu gewährleisten, dass wiederaufbereitete Batterien den Vorgaben der überarbeiteten europäischen Batterieverordnung hinsichtlich Produkt-, Umwelt- und Gesundheitsanforderungen genügen. Ausnahmen sind nur dann möglich, wenn die wiederaufbereiteten Batterien vor Inkrafttreten der neuen europäischen Batterieverordnung auf den Markt gekommen sind.

Die **Recyclingeffizienzen und Materialrückgewinnungsquoten** geben vor, wieviel Prozent der Altbatterien recycelt und wieviel Prozent der Rohstoffe zurückgewonnen werden müssen. Für Lithium-Ionen-Batterien gibt der BattVO-E eine Recyclingeffizienz von 65 % für 2025 und von 70 % für 2030 vor. Die Materialrückgewinnungsquoten sollen ab 2025 bei 90 % für Kobalt, Nickel sowie Kupfer und bei 35 % für Lithium liegen. Ab 2030 sollen die Rückgewinnungsquoten auf 95 % für Kobalt, Nickel sowie Kupfer und auf 70 % für Lithium gesteigert werden.

Ab 2027 soll eine **Kennzeichnung des recycelten Anteils** in Neubatterien durch die neue Batterieverordnung verpflichtend vorgeschrieben werden. Ab 2030 sollen **Mindestrecyclinganteile** bei Verwendung von Kobalt, Nickel und Lithium in den Aktivmaterialien vorgeschrieben werden. Der recycelte Anteil soll für Kobalt mindestens 12 %, für Nickel mindestens 4 % und für Lithium ebenfalls mindestens 4 % betragen. Ab 2035 soll dieser Anteil auf mindestens 20 % für Kobalt, 12 % für Nickel und 10 % für Lithium gesteigert werden. Durch die Vorgabe von Mindestrecyclinganteilen kann gewährleistet werden, dass ein Teil der Batteriematerialien mit einer für die Wiederverwendung hinreichenden Qualität recycelt werden und nicht in minderer Qualität in sekundäre Anwendungen fließen.

Die hier gelisteten Maßnahmen zeigen eine Vielzahl von Faktoren zur Etablierung einer Batteriekreislaufwirtschaft auf und bilden somit ein Fundament, das Planungssicherheit geben und zum Aufbau neuer Geschäftsfelder wie der Aufbereitung und dem Vertrieb von Second-Life-Batterien beitragen kann. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass es sich bei der aktuellen Fassung der neuen Verordnung um einen Entwurf handelt, der noch zur Diskussion steht und abgeändert werden kann. So kritisieren Industrieverbände wie Eurobat¹⁰⁴ und ZVEI¹⁰⁵ u. a. die Vorgabe von Mindestrecyclinganteilen als schwer überprüf- und umsetzbar. Problematisch könnte insbesondere eine geringe Verfügbarkeit an Recyclingmaterial sein, da für aktuelle Batterien eine Lebensdauer von acht bis 15 Jahren erwartet wird.¹⁰⁶ Es wird ein stark ansteigender Batteriebedarf prognostiziert¹⁰⁷, so dass das in acht bis 15 Jahren zur Verfügung stehende Recyclingmaterial nur einen kleinen Bruchteil des Bedarfs decken könnte. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit könnte der Preis für Recyclingmaterial stark ansteigen und zu einem Wettbewerbsnachteil für europäische Hersteller führen.

Aktuell kann noch nicht mit Sicherheit gesagt werden, welche Maßnahmen in der neuen europäischen Batterieverordnung verankert und mit welchem Zeithorizont sie umgesetzt werden. Dank der grundsätzlichen Bereitschaft der europäischen Batterieindustrie, an einer Kreislaufwirtschaft mitzuwirken¹⁰⁸, ist jedoch davon auszugehen, dass die neue Batterieverordnung ein stabiles Fundament zum Aufbau und zur Etablierung neuer Geschäftsfelder sein wird.

Das Hochfahren der Elektrofahrzeugproduktion wird die Wirtschaftlichkeit des Batterierecyclings verbessern

Aufgrund begrenzter natürlicher Rohstoffvorkommen für die Fertigung von Lithium-Ionen-Batterien innerhalb der europäischen Union kann der Rohstoffbedarf nicht ausschließlich aus europäischen Quellen gedeckt werden. Das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien senkt den Rohstoffimportbedarf und führt zu einer erhöhten Rohstoffunabhängigkeit. Für eine wirtschaftlich tragfähige Rohstoffunabhängigkeit

104 EUROBAT, 2021

105 ZVEI, 2021

106 IEA, 2020

107 Slowik et al., 2020

108 EUROBAT, 2020

ist es notwendig, dass die zurückgewonnenen Sekundärrohstoffe gegenüber Primärrohstoffen zu wettbewerbsfähigen Preisen angeboten werden.¹⁰⁹

Steigende Zulassungszahlen von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen werden zu einer erhöhten Nachfrage nach Batterierohstoffen führen, die wiederum steigende Preise für Primärrohstoffe erwarten lassen und den Preisdruck für Sekundärrohstoffe senken können. Die jüngere Vergangenheit zeigt jedoch, dass die Preise für die Primärrohstoffe aufgrund skalierbarer Abbaukapazitäten stark schwanken können. Prognostizierte Rohstoffpreise unterliegen folglich hohen Unsicherheiten, so dass unklar ist, wie stark sich der Preisdruck für Sekundärrohstoffe ändern wird.¹¹⁰

Einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der Recyclingkosten kann der korrespondierend zu den steigenden Zulassungszahlen wachsende Anteil an Altbatterien leisten. Durch die bisher geringen Zulassungszahlen ist der Rücklauf an Batteriepacks aus alten Elektrofahrzeugen gering. Im Jahr 2019 fielen in Deutschland insgesamt 5.708 t Lithium-Ionen-Altbatterien an, die u. a. aus Batteriepacks von alten Elektroautos oder aus Rückrufaktionen stammen.¹¹¹ Dem steht eine Recyclingkapazität von über 16.000 t gegenüber.¹¹² Die aktuell noch geringe Auslastung sowie eine hohe Komplexität und Varianz der Batteriepacks haben zur Folge, dass für weitere Recyclingschritte eine manuelle Demontage erfolgen muss. Durch das hohe Gewicht der Batteriepacks sind spezielle Werkzeuge für die Handhabung notwendig. Das Personal muss technisch für den Umgang mit Hochspannungsbatterien geschult sein und aufgrund von leicht brennbaren sowie giftigen Substanzen müssen entsprechende Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden.¹¹³

Die manuelle Demontage und der damit verbundene Aufwand sind Kostentreiber, die einem wirtschaftlichen Recy-

cling entgegenstehen. Aus diesem Grund fokussieren sich die Recyclingunternehmen insbesondere auf die Rückgewinnung von Rohstoffen mit hohen Marktpreisen, wie Kobalt, Nickel und Kupfer.¹¹⁴

Durch die steigende Menge an Altbatterien können Recyclingschritte wie die Demontage von Batteriepacks automatisiert werden, da die Anlagen entsprechend ausgelastet werden und so die hohen Investitionskosten rechtfertigen. Weiterhin senkt eine höhere Auslastung Transportkosten. Die erzielten Effizienzsteigerungen führen zu einer erhöhten Profitabilität und zu einem verbesserten CO₂-Fußabdruck. Durch die erhöhte Profitabilität kann schließlich auch das Recycling von weiteren Rohstoffen wie Lithium, Graphit oder Mangan attraktiv werden.

Eine Automatisierung der Recyclingschritte ist jedoch nicht trivial. Insbesondere die Demontage eines Batteriepacks stellt eine komplexe Aufgabe dar, da diese nicht einheitlich sind. Die Batteriepacks und deren Komponenten sind oftmals mittels Schweiß- und Klebeverbindungen gefügt, wodurch sie sich nicht einfach auftrennen lassen¹¹⁵. Aktuelle Projekte wie z. B. DeMoBat¹¹⁶ oder ZDR-EMIL¹¹⁷ nehmen sich dieser Fragestellung an und entwickeln technologische Lösungen, um die Demontage zu automatisieren. Einen Beitrag zur Reduzierung der Komplexität können u. a. Designstandards und einheitliche Kennzeichnungen liefern.

Durch die Aufbereitung und Wiederverwendung von Altbatterien werden Rohstoffe effizienter genutzt

Alternativ zum Recycling kann am Ende der ersten Nutzungsphase die Altbatterie aufbereitet und wiederverwendet werden. Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, wird erwartet, dass Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen nach etwa acht bis 15 Jahren ihr Lebensende erreichen werden. Das Lebensende für Traktionsbatterien wird in der Regel so definiert,

109 IEA, 2020

110 DERA, 2021

111 Scholz, 2021

112 Summerville et al., 2021

113 Harper et al., 2019

114 DERA, 2021

115 Harper et al., 2019

116 Fraunhofer IPA, 2021

117 Fraunhofer IWKS, 2020

dass nur noch 80% der Anfangskapazität zur Verfügung stehen. Es heißt jedoch nicht, dass die Batterie nicht mehr funktionsfähig ist. Somit ergeben sich Möglichkeiten, die noch vorhandenen Restkapazitäten in anderen Anwendungen zu nutzen, die geringere Anforderungen an die Energiedichte haben. Mögliche Anwendungen wären z. B. stationäre Batterie-Energiespeichersysteme (BESS), die erneuerbare Energien zwischenspeichern und bedarfsgerecht zur Verfügung stellen können.

Durch die Wieder- bzw. Weiterverwendung würde die Batterie und die darin enthaltenen Materialien länger genutzt werden, ohne dass energieaufwändige Synthese-, Prozessierungs- oder Produktionsschritte notwendig werden. Das Verhältnis „in der Batterie gespeicherter Energie“ zu „für die Produktion aufgewendete Energie“ würde sich weiter verbessern, ebenso wie die CO₂-Bilanz der Batterie. Aus der ökologischen Nachhaltigkeitsperspektive liegen die Vorteile der Wiederverwendung also klar auf der Hand.

Es stellt sich jedoch die Frage, ob die Wieder- oder Weiterverwendung auch aus ökonomischer Sicht nachhaltig ist. Die Second-Life-Batterien müssen preislich mit Neubatterien konkurrieren. Laut Boston Consulting Group wären die Nutzer bereit, maximal 60% des Preises einer Neubatterie für eine Second-Life-Batterie zu bezahlen.¹¹⁸ In Anbetracht aktuell fallender Batteriepreise stellt sich somit ein deutlicher Wertverlust während der Nutzungsphase ein. Beispielsweise haben Tesla und Volkswagen angekündigt, dass sich die Batteriepreise durch technologische Weiterentwicklung und Effizienzsteigerungen um über 50% senken lassen (vgl. Kapitel 2.5). Diese Kostenprognose gilt zwar zunächst primär für Traktionsbatterien, jedoch ist davon auszugehen, dass sich die Kostenreduktion auch auf die Batteriepreise für stationäre Energiespeichersysteme auswirken wird. Second-Life-Batterien werden daher nur zu einem Bruchteil der heutigen Kosten angeboten werden können. Der erwartete aber schwer zu prognostizierende Preisverfall erschwert die Planung von Geschäftsmodellen.

Damit die Aufbereitung von Traktionsbatterien für Second-Life-Speicher wirtschaftlich profitabel ist, muss diese mit möglichst wenigen und möglichst effizienten Arbeitsschritten erfolgen. Aufgrund der bereits im Argument „Steigende Elektroauto-Zulassungszahlen führen zu einer erhöhten Roh-

stoffnachfrage und zu einer steigenden Anzahl an Altbatterien, die ein wirtschaftliches Recycling ermöglichen werden“ geschilderten hohen Varianz und Komplexität, ist die Demontage von Batteriepacks jedoch ein aufwändiger Prozess, so dass bei der Aufbereitung einzelner Komponenten zusätzliche Kosten entstehen, die sich negativ auf die Profitabilität auswirken. Selbst bei der direkten Verwendung von Batteriepacks fallen zusätzliche Kosten an, z. B. für den Ausbau aus dem Fahrzeug, die Zustandsüberprüfung, Logistik und den Wiedereinbau.

Zur Erzielung einer ökonomischen Nachhaltigkeit ist es also notwendig, den Aufwand für die Wiederaufbereitung möglichst gering zu halten. Wie beim Recycling können bei steigenden Altbatteriemengen Automatisierungsvorgänge zur Kostenreduzierung beitragen. Eine weitere wichtige Stichschraube sind Vorgaben und Standards, die zur Vereinheitlichung von Batteriepacks beitragen. Beispielsweise könnten Design-Richtlinien zur Reduzierung der Komplexität beitragen. Weiterhin kann der Zugang zu den Daten des Batteriemangementensystems den Aufwand für die Zustandsüberprüfung deutlich reduzieren oder sogar obsolet machen.

Unabhängig von der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit sind regulatorische Fragen, z. B. hinsichtlich der erweiterten Herstellerverantwortlichkeit oder der Produktgewährleistung, zu klären. Wie zu Beginn des Kapitels aufgezeigt, liefert der aktuelle Entwurf der europäischen Batterieverordnung Lösungsvorschläge zu solchen regulatorischen Fragenstellungen und kann somit zur Etablierung dieses neuen Geschäftsfeldes beitragen.

Exkurs: Abschätzung Verhältnis „In Batterie gespeicherter Energie ($Batt_{\text{Energie}}$)“ / „Für Produktion aufgewendete Energie ($Prod_{\text{Energie}}$)“ und Einfluss von Second-Life Anwendungen

Betrachtet wird ein Batteriepack mit 23,5 kWh Energiegehalt (100% State-of-Health [SoH]). Die Produktion des Batteriepacks benötigt ca. 1125 MJ/kWh. Für das gesamte Batteriepack sind also ca. 26000 MJ oder 7,3 GWh Energie ($Prod_{\text{Energie}}$) notwendigⁱ.

Das Verhältnis $Batt_{\text{Energie}}$ zu $Prod_{\text{Energie}}$ in Abhängigkeit der Zyklenzahl ist in unten stehendem Graphen für den 1. Lebenszyklus sowie zwei 2. Lebenszyklen abgebildet. Als Hypothese wird angenommen, dass der 2. Lebenszyklus einmal nach 1.000 Zyklen und einmal nach 2.000 Zyklen im 1. Lebenszyklus beginnt.

Unter den unter Berechnung genannten Annahmen wird bei 1.000 Vollzyklen gut doppelt so viel Energie der Batterie gespeichert wie für die Produktion aufgewendet. Wird 80% SoH erst nach 2.000 Zyklen erreicht, so konnte gut

4,5-mal so viel Energie in der Batterie gespeichert werden wie für die Produktion aufgewendet wurde.

Aufgrund der geringeren Restkapazität verläuft die Kurve $Batt_{\text{Energie}}/Batt_{\text{Prod}}$ in Abhängigkeit der Zyklenzahl für die Second-Life-Anwendungen flacher. Es ist also erstrebenswert, möglichst viele Zyklen im 1. Leben zu fahren. Dennoch liegt die Verbesserung des Verhältnisses mit zunehmender Zyklenzahl auch im 2. Lebenszyklus klar auf der Hand.

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich hier um eine erste Abschätzung unter vereinfachten Annahmen handelt, die einen Eindruck vermitteln soll, wie das Verhältnis der in Batterie gespeicherten zu der für die Produktion aufgewendeten Energie in Abhängigkeit der Zyklenzahl entwickelt. Insbesondere die Vorhersage der Zyklenzahl im 2. Lebenszyklus ist Gegenstand vieler wissenschaftlicher Untersuchungen, so dass die hier abgebildeten Zyklenzahlen rein hypothetischer Natur sind.

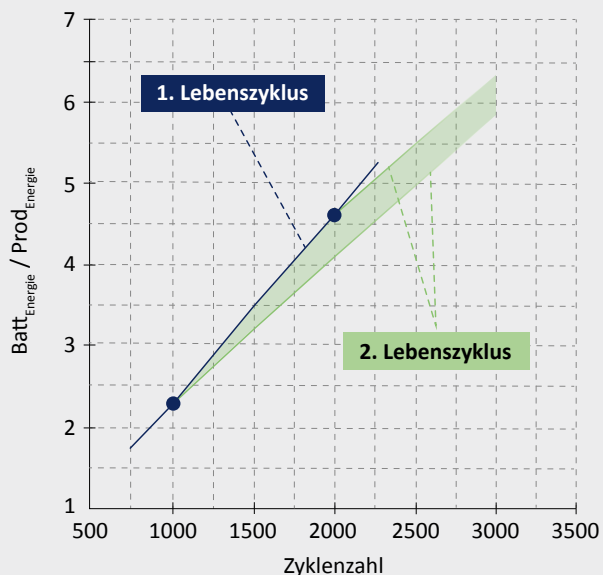


Abbildung 7: Abschätzung $Batt_{\text{Energie}}/Prod_{\text{Energie}}$ in Abhängigkeit der Zyklenzahl für den 1. Lebenszyklus sowie zwei 2. Lebenszyklen. Eigene Darstellung.

Berechnung:

Es wird angenommen, dass das Batteriepack bei 80% SoH (18,8 kWh Restenergie) das Ende des 1. Lebenszyklus erreicht hat. Das Ende des 2. Lebenszyklus wird bei 60% SoH (14,1 kWh Restenergie) erreicht. Für die Abschätzung wird angenommen, dass die Batterie in jedem Zyklus zu 80% entladen wird (Depth-of-Discharge [DoD]) und anschließend wieder voll aufgeladen wird.

Stark vereinfacht wird für die im ersten Leben pro Zyklus speicherbare Energiemenge der Mittelwert aus 100% SoH und 80% SoH gebildet. Im 2. Lebenszyklus wird der Mittelwert aus 80% SoH und 60% SoH gebildet.

Die in der Batterie gespeicherte Energie wird wie folgt abgeschätzt:

$$Batt_{\text{Energie}} (1. \text{ Lebenszyklus}) = \text{Zyklenzahl} * \text{DoD} * (\text{SoH}_{100} + \text{SoH}_{80}/2)$$

$$Batt_{\text{Energie}} (2. \text{ Lebenszyklus}) = Batt_{\text{Energie}} (1. \text{ Lebenszyklus}) + \text{Zyklenzahl} (2. \text{ Lebenszyklus}) * \text{DoD} * (\text{SoH}_{80} + \text{SoH}_{60}/2)$$

2.4 Rohstoff-Governance

2.4.1 Technologische Neuerungen bereiten den Weg zu sauberen Batterien

- Die Herstellung aktueller Lithium-Ionen-Batterien erfordert den **Einsatz von Rohstoffen**, die teilweise als kritisch eingestuft sind.
- Die Weiterentwicklung von **Technologien** im Bereich der Rohstoffgewinnung, -aufbereitung und -verarbeitung verringern die Umweltauswirkungen in der Rohstoffgewinnung.
- **Neue digitale Konzepte** erlauben die lückenlose und überprüfbare Dokumentation von Material- und Informationsflüssen einzelner Produkte in der Lieferkette.

Durch Innovationen lassen sich kritische Rohstoffe in Batteriezellen reduzieren oder substituieren

Für die Herstellung aktueller Lithium-Ionen-Batterien werden Rohstoffe benötigt, die aus unterschiedlichen Gründen (s. Infokasten) zu den kritischen Rohstoffen gehören. Je nach Zelltechnologie sind dies derzeit vor allem Kobalt, Lithium und natürlicher Graphit. Seit der Kommerzialisierung der ersten Lithium-Ionen-Batterie vor 30 Jahren wurden die funktionellen Bestandteile stetig modifiziert und variiert. Ursächlich waren häufig technologische oder wirtschaftliche Aspekte. Derzeit werden Innovationen vor allem durch Anforderungen vorangetrieben, die sich aus der Nachhaltigkeit von Batteriezellen ergeben, sowie durch die weitere technische Optimierung der Leistungsparameter.

Kobalt gehört zu den teuersten Metallen in einer Lithium-Ionen-Batterie. Mit aktuell ca. 30 Tausend (Tsd.) US-Dollar (USD) pro Tonne ist Kobalt etwa doppelt so teuer wie Nickel (12 Tsd. USD/t) oder Lithium (18 Tsd. USD/t).¹¹⁹ Dementsprechend arbeiten Zellhersteller intensiv daran, den Kobaltanteil in Li-Ion-Batterien zu reduzieren. Heutige Batteriegenerationen enthalten bereits deutlich weniger Kobalt. Während

Was sind kritische Rohstoffe?

Laut EU Definition werden Metalle und Mineralien als kritisch bezeichnet, wenn diese für die Wirtschaft wichtig und mit einem hohen Versorgungsrisiko verbunden sind. Das Versorgungsrisiko ergibt sich aus der globalen Konzentration von Primärrohstoffen, der Regierungsführung der Lieferländer, Umweltaspekten, dem Beitrag des Recyclings, Substitutionsmöglichkeiten sowie der Abhängigkeit der EU von Importen und Handelsbeschränkungen in Drittländern. Die EU hat derzeit 30 kritische Rohstoffe benannt, darunter die für Batterien wichtigen Rohstoffe Lithium, Kobalt und natürlicher Graphit.ⁱ

Aus Unternehmenssicht spielen zusätzlich Faktoren wie Preisstabilität, Verlässlichkeit der Zulieferer sowie Verfügbarkeit von zertifizierten Rohstoffen eine wichtige Rolle. Insbesondere Rohstoffe, die auch in der öffentlichen Wahrnehmung mit negativen Aspekten assoziiert sind (z. B. Kinderarbeit beim Kobaltabbau), können zu einem erheblichen Reputationsrisiko führen, wenn diese aus nicht-zertifizierten Quellen stammen.

ⁱ Europäische Kommission, 2020g

die Kathoden der ersten Generationen (Anfang der 90iger Jahre) noch zu 60 Gewichtsprozent (wt%) aus Kobalt bestanden (LiCoO_2), wird in aktuellen Varianten Kobalt anteilig durch Elemente wie Nickel, Mangan oder Aluminium substituiert. Derzeitige NMC622-Kathoden¹²⁰ enthalten nur noch 10 wt% Kobalt. Tesla gibt den Kobaltanteil seiner Batterien derzeit mit 2,8 wt% an (Kobaltanteil bezogen auf die gesamte Batterie).¹²¹ Gleichzeitig hat sich die relative gravimetrische Energiedichte der NMC-basierten Batterien innerhalb der letzten zehn Jahre fast verdoppelt, infolgedessen der Kobaltanteil zudem effektiver genutzt wird.¹²² Auch kobaltfreie Batteriezellen, z. B. auf Basis von Lithium, Eisen und Phosphor (Lithiumeisenphosphat, LiFePO_4) kommen zum Einsatz. Dadurch werden Reputationsrisiken umgangen, die Kosten gesenkt und die Resilienz in der Lieferkette erhöht. Zahlreiche

119 Götz, 2019

120 Anmerkung: Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide mit der chemischen Summenformel: $\text{LiNi}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$ (=NMC622)

121 Seiwert, 2019

122 Field, 2020

OEMs haben bereits angekündigt, für ihre Einstiegsmodelle auf die kostengünstigere LiFePO₄-Batterien¹²³ zu setzen.^{124 125}

Beim Graphit, dem Hauptbestandteil der Anoden, haben Batteriehersteller die Wahl zwischen natürlichem und synthetischem Graphit. Letzterer wird bei hohen Temperaturen aus Koks und Rückständen der Erdölindustrie gewonnen. Nachwachsende Rohstoffe als alternative Kohlenstoffquelle werden untersucht. Die Treibhausgasemissionen bei der Produktion von synthetischem Graphit hängen stark vom verwendeten Energiemix ab.¹²⁶ Durch die Beimischung von Silizium in die Anode, können Performancesteigerungen erzielt werden, was den Bedarf an Graphit pro kWh-Batterieenergie senkt.

Auch Batterietechnologien ohne Lithium werden neu bzw. weiterentwickelt, z.B. Redox-Flow-Batterien. Aufgrund der deutlich reduzierten Energiedichte und des schlechteren Wirkungsgrades werden diese zwar nicht für mobile Einsätze nutzbar sein, sehr wohl aber für stationäre Anwendungen. Weltweit entstehen erste große Redox-Flow-Batteriespeicher. So steht aktuell eine 20 MWh-Pilotanlage auf dem Gelände des Fraunhofer ICT in Pfinztal¹²⁷, eine 60 MWh-Anlage auf Hokkaido in Japan¹²⁸, sowie eine 10 MWh-Anlage in Shenyang in China.¹²⁹ Eine 800 MWh-Anlage in der Region Dalian, China, ist in Planung.¹³⁰

Neue Technologien verringern die Umweltauswirkungen in der Rohstoffgewinnung und ermöglichen die Erschließung neuer Rohstoffvorkommen

Der Druck auf die einzelnen Akteure in der Lieferkette der Batterierohstoffe steigt. Viele OEMs fordern zunehmend hohe Umwelt- und Sozialstandards in ihren Lieferverträgen

ein. Gegenwärtig werden neue Technologien im Bereich der Rohstoffgewinnung, -aufbereitung und -verarbeitung entwickelt, um den aus den Anforderungen der Nachhaltigkeit resultierenden Herausforderungen gerecht zu werden.

Beispiel Lithium: Für die Produktion von Lithium aus Sole wird dem Untergrund derzeit viel Salzwasser entnommen, welches in großen Becken verdunstet. Anwohner solcher Gewinnungsanlagen befürchten, dass dadurch der Süßwasserspiegel absinken könnte. Nun ist es einer deutschen Firma gelungen, Lithiumhydroxid in hochreiner Form direkt aus Restsole zu gewinnen. Die Restsole ist bis dato ein Abfallprodukt der Lithiumproduktion, welches entsorgt werden musste. Ein großer Vorteil: Es muss keine zusätzliche Sole gefördert werden und der Grundwasserspiegel wird nicht zusätzlich abgesenkt. Ein geplantes Projekt zur Industrialisierung dieser Technologie ist bereits in Vorbereitung.¹³¹

Beispiel Nickel: In Finnland startet ein Unternehmen ein Projekt, in dem mittels Bio-Leaching Nickel gewonnen werden soll. Bei diesem Verfahren werden Mikroorganismen eingesetzt, um Metalle energieeffizient aus dem Erz zu lösen und aufzufangen. Die erwünschten Nickelsalze können dann direkt aus der Laugenlösung ausgefällt werden. Auf diese Weise können Abraumhalden mit niedrigem Erzgehalt nutzbar gemacht und gleichzeitig Batterierohstoffe mit deutlich niedrigerem CO₂-Fußabdruck (bis zu -60%) angeboten werden.¹³²

Recycling: Auch das Recycling spielt eine wichtige Rolle. Mehrere große OEMs haben angekündigt, eigene Recyclinganlagen für ihre Batterien aufbauen zu wollen. Einerseits, um sich neue Rohstoffquellen zu erschließen, andererseits, um die

123 Anmerkung: Phosphor wird von der EU als kritischer Rohstoff geführt. Dies liegt an der begrenzten Verfügbarkeit von Phosphorprimärquellen sowie der hohen wirtschaftlichen Bedeutung für die Landwirtschaft. Im Vergleich zur Landwirtschaft wird die globale Batterieproduktion von Eisenphosphat-Batterien nur einen geringen Anteil am Phosphatbedarf ausmachen.

124 Seyerlein & Prawitz, 2020

125 Zhang, 2020

126 Dolega et al., 2020

127 Fraunhofer ICT, 2021

128 Solarserver, 2013

129 Rongke, 2012

130 Vanadium, 2020

131 ACISA, 2021

132 Terrafame, 2020

Anforderungen zukünftiger Regulatorik (vgl. Kapitel 1.3) zu erfüllen.^{133 134 135} Bis zu 95% der Batteriematerialien lassen sich mit modernen hydrometallurgischen Recyclingverfahren bereits zurück gewinnen.¹³⁶ Diese Technologien erlauben somit eine echte Kreislaufführung von wertvollen Batterierohstoffen und haben das Potenzial, die Rohstoffabhängigkeit Europas in der Zukunft abzusenken.

Neue digitale Technologien in der Produktverfolgung sowie der nachhaltige Umgang mit Rohstoffen schaffen transparente und verantwortungsvolle Lieferketten

Neue digitale Technologien und Konzepte („digitaler Zwilling“) in der Lieferkette erlauben die lückenlose und überprüfbare Dokumentation von Material- und Informationsflüssen für ein einzelnes Produkt. So hat Volvo/Polestar angekündigt, zusammen mit seinem Batteriezelllieferanten und dem Blockchain-Spezialisten Circular neue Technologien zur Rückverfolgbarkeit von Rohstoffen zu nutzen, um Kobalt in seiner Lieferkette sicher verfolgen zu können.¹³⁷ Ein ähnliches Projekt wird auch von Ford zusammen mit dem Blockchain-Spezialisten Everledger vorangetrieben.¹³⁸

Die Re|Source Initiative, gegründet von CMOC, Glencore und ERG in 2019, gab kürzlich bekannt, bereits 2022 ein auf Blockchain basierendes System ausrollen zu wollen, welches die „Verfolgung von verantwortungsbewusst produziertem Kobalt von der Mine bis zum Elektroauto“ ermöglichen soll.¹³⁹

Auf dem Weltwirtschaftsforum 2017 in Davos haben sich über 40 verschiedene Vertreter:innen aus Industrie, aus NGOs und Regierungsorganisationen zur Global Battery Alliance zusammengeschlossen. Sie ist auf dem Weg, eine eigenständige Non-Profit-Organisation zu werden. Eines ihrer Flaggschiffprojekte ist die Entwicklung eines Batteriepasses, ein digitaler Zwilling einer jeden Batterie. Der Batteriepass soll einen sicheren und diskriminierungsfreien Datenaus-

Was ist ein digitaler Batteriepass?

Das Konzept Batteriepass sieht die Erzeugung eines digitalen Zwillings für jede Batterie vor. In diesem werden (überprüfbar und fälschungssicher) Information zur Materialprovenienz, zur Batterie-Performance, zum CO₂-Fußabdruck und ggf. weiteren Umweltindikatoren zusammengeführt. Anwender:innen der Batterien stehen diese Informationen zur Verfügung, die dabei unterstützen, fundierte Geschäftsentscheidungen zu treffen. Im neuen Vorschlag zur EU-Batterieverordnung wird ein Batteriepass verpflichtend für Batterien mit einer Energie von über 2 kWh gefordert.

tausch zwischen Beteiligten in der Batteriewertschöpfungskette ermöglichen und gleichzeitig die notwendige Transparenz für öffentliche und private Einrichtungen schaffen. Ziel ist es, die Transparenz in der Lieferkette zu erhöhen, die sichere Rückverfolgbarkeit von Rohstoffen zu gewährleisten und Daten auf wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Ebene einheitlich zu erheben.¹⁴⁰

Der Batteriepass soll wesentliche Informationen über die Nachhaltigkeit und Performance der Batterie zusammenführen und so den Nutzer:innen von Batterien verlässliche Informationen liefern. Auch Werkstätten, Wiederverkäufer, Second-Life-Anwender und Recycler sollen vom Batteriepass profitieren können, damit diese in die Lage versetzt werden, Geschäftsentscheidungen fundiert treffen zu können. So können Daten zur Batteriehistorie, des State-of-Health und der Batteriechemie bzw. der Zusammensetzung der Batterie genutzt werden, um verlässlich die verbleibende Lebensdauer oder den Restwert einer Batterie ermitteln bzw. die Wirtschaftlichkeit für Second-Life-Anwendungen abzuschätzen zu können. Der Batteriepass hat deshalb das Potenzial, das Vertrauen in die Batterierohstoffe zu erhöhen, legislative

133 Ingenieur.de, 2019

134 BMW, 2020a

135 Volkswagen, 2019a

136 Kunde, 2019

137 Polestar, 2021

138 Roman, 2021

139 Randall, 2021

140 World Economic Forum, 2020

Vorgaben zu erfüllen (z. B. die Einführung eines Batteriepasses, wie es im Entwurf der EU-Batterieverordnung vorgesehen ist) und gleichzeitig zirkuläre Geschäftsmodelle zu katalysieren.

2.4.2 Neue legislative Initiativen schaffen einen Rahmen für mehr Transparenz und Nachhaltigkeit bei der Beschaffung von Batterierohstoffen

- Die Gewinnung von Rohstoffen für die Batteriezellfertigung erfolgt zum Großteil außerhalb Europas, oft in Ländern mit **niedrigeren Umwelt- und Sozialstandards**, infolge dessen häufig ökologische, soziale und ökonomische Herausforderungen bestehen.
- Zahlreiche legislative Maßnahmen und Initiativen seitens der abnehmenden Industrie zielen auf einen **nachhaltigen Abbau von Rostoffen** ab.
- Gesetze und Verordnungen stärken die **Sorgfaltspflicht**, wodurch Rechtsklarheit geschaffen und die Einhaltung von Menschenrechten durch Unternehmen gestärkt wird.

Technische Innovationen und Nachhaltigkeitsstandards mindern die Auswirkungen der Rohstoffgewinnung

Die Rohstoffgewinnung für die Batteriezellfertigung erfolgt zum Großteil außerhalb Europas, häufig in Ländern mit niedrigeren Umwelt- und Sozialstandards, und damit fernab der Reichweite von regulatorischen Auflagen europäischer Länder. Die Lieferketten bei Rohstoffen sind teilweise intransparent und entziehen sich häufig dem Einfluss der Endabnehmer:innen. Deutschland ist als hochentwickelte Industrie- und Exportnation auf eine sichere und nachhaltige Rohstoffversorgung angewiesen. Gleichzeitig ist die öffentliche Wahrnehmung der Batterierohstoffe geprägt von Menschenrechtsverletzung, Umweltverschmutzung und Konflikten um Ressourcen. Sehr häufig im Fokus stehen dabei Kobalt¹⁴¹ im Zusammenhang mit Menschenrechtsverletzungen (vgl. Anhang 4.1.1), Lithium¹⁴² im Zusammenhang mit hohem Wasserverbrauch (vgl. Anhang 4.1.2) und Graphit¹⁴³

im Zusammenhang mit Umweltverschmutzung (vgl. Anhang 4.1.3). Aber auch Umweltkatastrophen im Zusammenhang mit der Nickel¹⁴⁴ oder Kupferproduktion¹⁴⁵ beeinträchtigen das Image der Batterien.

Die ökologischen, sozialen und ökonomischen Herausforderungen infolge des Bedarfs an Batterierohstoffen sind komplex und bedürfen einer spezifischen Betrachtung.

Kobalt

Ein großer Teil der Kobaltförderung (etwa 70%) findet in der Demokratischen Republik Kongo statt, wo es vorwiegend als Nebenprodukt in den Kupferminen gewonnen wird. Zwar erfolgt der Abbau zumeist in großen industriellen Minen, mit etwa 10% der globalen Kobaltförderung wird jedoch ein nicht unerheblicher Teil im Kleinbergbau („artisanal mining“) gefördert. Der hohe Kobaltpreis, die oberflächennahe Lage der kobalthaltigen Erze sowie fehlende alternative Verdienstmöglichkeiten der lokalen Bevölkerung machen diese Form von Bergbau für vielen Menschen in Zentralafrika attraktiv. Dabei handelt es sich nicht immer um illegale Minen. Der Kleinbergbau ist im kongolesischen Gesetz verankert und spezielle Gebiete sind eigens hierfür ausgewiesen. Die Arbeiten werden dort meist mit einfachsten Werkzeugen durchgeführt. Es gibt auch Berichte über Kinderarbeit, Zwangsarbeit und desolaten Arbeitsschutz. Kobalt zu vermeiden, welches unter diesen Umständen gewonnen wird, ist allerdings unter aktuellen Bedingungen nicht einfach möglich. Die geförderten Erze werden zumeist von Zwischenhändlern aufgekauft und in Kobaltschmelzen zusammen mit Erzen aus anderen Minen weiterverarbeitet, was eine Rückverfolgbarkeit der Erze oftmals unmöglich macht.

Um Reputationsrisiken zu minimieren, den Zugang zu wertvollen Rohstoffen zu sichern und den starken Preisschwankungen auf dem Weltmarkt nicht direkt ausgesetzt zu sein, haben viele Zellproduzenten und Automobilhersteller Maßnahmen zur Lösung der vielschichtigen Herausforderungen beim Kobalt gestartet. Zahlreiche OEMs haben Lieferverträge mit großen Bergbaukonzernen abgeschlossen, um zu verhindern, dass Kobalt aus nicht zertifizierten Quellen in die

141 Frankel, 2016

142 Frankel & Whoriskey, 2016

143 Whoriskey, 2016

144 Spiegel, 2020

145 Board, 2017

Lieferketten des Konzerns kommt und um den Zugang zu zertifizierten Rohstoffen langfristig zu sichern.^{146 147}

Im Auftrag einer privaten Initiative von BASF, BMW und Samsung führt die Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) das Pilotvorhaben „Cobalt for Development“ durch mit dem Ziel, die Arbeits- und Lebensbedingungen der Menschen im Kleinbergbau nachhaltig zu verbessern.¹⁴⁸ VW ist dieser Initiative beigetreten und konzipiert in Zusammenarbeit mit der Responsible Minerals Initiative (RMI) ein Zertifizierungssystem für Kobaltschmelzen.¹⁴⁹

Der Daimler Konzern arbeitet zusammen mit RCS Global daran, den branchenweit anerkannten Bergbaustandard „Standard for Responsible Mining“ der Initiative for Responsible Mining Assurance (IRMA) zu einem Schlüsselkriterium für Lieferantenentscheidungen und -verträge in Rohstofflieferketten zu machen.¹⁵⁰

Tesla veröffentlicht jährlich ein „Conflict Mineral Report Template (CMRT)“, in dem die ergriffenen Anstrengungen dargelegt werden, Menschenrechtsverletzungen entlang der Lieferkette der 3TG¹⁵¹ Konfliktminerale Gold, Zinn, Wolfram, Tantal sowie Kobalt zu vermeiden.¹⁵² Diese Veröffentlichung ist eine regulatorische Auflage aus dem Dodd-Frank-Act für an US-Börsen gelistete Unternehmen.

Lithium

Die weltweit größten bekannten Lithiumreserven befinden sich in einer Hochebene, bekannt als „Lithium Triangle“, welche sich über Chile, Argentinien und Bolivien erstreckt. Dabei handelt es sich in der Regel um lithiumhaltige Sole im Untergrund.

Für die Lithiumproduktion wird diese Sole an die Oberfläche gepumpt. In riesigen Verdunstungsbecken wird das Wasser verdunstet und die gelösten Mineralien schrittweise ausgefällt. Da dem Untergrund dabei große Mengen Sole entnommen werden, besteht die Befürchtung, dass Süßwasser aus umliegenden Gegenden nachläuft und den Grundwasserspiegel der umliegenden Gemeinden folgenreich absenkt. Das gefährdet die Lebensgrundlage vieler Menschen in dieser Gegend, die stark von der Landwirtschaft, dem Tourismus sowie der Salzernte in den Wüsten abhängig sind. Gleichzeitig benötigt die Lithiumproduktion nur wenige Arbeitskräfte, weshalb die lokale Bevölkerung nicht durch zunehmende Beschäftigung teilhat. Die lokalen Gemeinden profitieren in der Regel wenig von der stärker werdenden Lithiumnachfrage.^{153 154}

Aufgrund der stetig steigenden weltweiten Lithiumnachfrage und dem schnell wachsenden Weltmarktanteil Australiens, hat die chilenische Regierung zwischen 2016 und 2018 die Verträge für den Lithiumabbau neu verhandelt. Demnach soll der Export von Lithiumcarbonat von 80.417 Tonnen im Jahr 2017 auf 300.000 Tonnen steigen.¹⁵⁵ In den neuen Verträgen zwischen Regierung und Lithiumproduzenten wurde vereinbart, verstärkt neue, wassersparende Technologien einzusetzen, wie z. B. die Wasserrückgewinnung durch Kondensation des verdunsteten Wassers, das Zurückpumpen der Sole nach der Lithiumgewinnung sowie Membrantechnologien zur direkten Abscheidung von Lithium aus der Sole.

Gleichzeitig erhöhen auch Abnehmer den Druck auf die Lithiumproduzenten. So hat beispielsweise BMW angekündigt, einen Vertrag mit Livent für nachhaltig produziertes Lithium abzuschließen. Diese Firma nutzt ein Verfahren für die Lithiumgewinnung, bei der die Sole nach der Lithiumtrennung wieder direkt in den Untergrund zurückgepumpt wird. Da-

146 Johannsen, 2020

147 BMW, 2020b

148 Volkswagen, 2020b

149 Volkswagen, 2021a

150 Daimler, 2021

151 3TG steht für die Mineralien engl. Tin, Tungsten, Tantal, Gold.

152 Tesla, 2020

153 Boddenberg, 2020

154 Götze, 2019

155 Bürof, 2019

durch soll ein Absinken des Grundwasserspiegels vermieden werden.¹⁵⁶

Auch in Deutschland gibt es Lithiumvorkommen. So befinden sich im Rheingraben im Südwesten von Deutschland größere Lithiumvorkommen in Form von Thermalwasser/Sole. Erste Schätzungen gehen davon aus, dass theoretisch genug Lithium für 400 Mio. Elektroautos im Boden lagert.¹⁵⁷ Ein Pilotprojekt am Geothermie-Kraftwerk Bruchsal soll zeigen, ob hier Lithium wirtschaftlich gewonnen werden kann. Etwa 800 Tonnen Lithium pro Jahr könnten als Nebenprodukt des Geothermie-Kraftwerks gewonnen werden.¹⁵⁸ Um Rechtsunsicherheiten beim Abbau dieser Ressourcen zu beseitigen, wurde 2021 die Neufassung des deutschen Berggesetzes beschlossen. Durch die Änderung gilt jetzt auch Lithium in Form von Sole als bergfreier Bodenschatz.¹⁵⁹ Zuvor war ausschließlich Lithiumerz im Gesetzestext erwähnt.¹⁶⁰

In Serbien arbeitet der Bergbaukonzern Rio Tinto an der Erschließung eines großen Lithiumvorkommens. Das Unternehmen entdeckte im Jahr 2004 in der Region Jadar ein bis dato unbekanntes Natrium-Lithium-Bor-Silikat-Hydroxid-Mineral ($\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$), welches den Namen „Jadarit“ trägt (nach der serbischen Region). Dieses Mineral soll, laut ersten Erkenntnissen, als eine geeignete Quelle für hochreines Lithiumcarbonat im „battery grade“ ($> 99,5\% \text{Li}_2\text{CO}_3$) dienen. Borate (Verwendung für Glasfasern, Keramiken, etc.) und Natriumsulfat (u. a. Arzneimittel) fallen als Nebenprodukte an. Die Mineralressourcen in der Jadar-Region belaufen sich auf 136 Mio. Tonnen, äquivalent zu 2,5 Mio. Tonnen an Lithiumcarbonat (Li_2CO_3) beziehungsweise 21 Mio. Tonnen Boraten (B_2O_3). Dies entspräche einer jährlichen Produktion von Lithiumcarbonat von 55.000 Tonnen – zum Vergleich sollten im Salar de Uyuni Projekt (ACI Systems)¹⁶¹ 35.000 Tonnen Lithiumsalz jährlich abgebaut werden. Bei geschätzten Lithiumreserven von 17 Mio. Tonnen, ist die Jadar-Region ein

wichtiger strategischer Standort für den kritischen Rohstoff Lithium auf dem europäischen Kontinent, um die Rohstoffabhängigkeit insbesondere von politisch instabilen Regionen zu minimieren.¹⁶²

Graphit

Der überwiegende Teil der weltweiten Graphitproduktion aus natürlichen Graphitvorkommen findet in Ländern mit vergleichsweise niedrigen Umweltstandards statt. China ist einer der größten Produzenten von natürlichem wie auch synthetischem Graphit. Insbesondere die Produktion von natürlichem Graphit kann schwerwiegende Umweltauswirkungen haben, wenn grundlegende Arbeits- und Umweltschutzauflagen missachtet werden. Graphit ist zwar ungiftig, allerdings können verfahrensbedingte Staubbelastung sowohl im direkten Arbeitsumfeld als auch in umliegenden Siedlungen zu gesundheitlichen Problemen führen. Zudem werden zur Aufreinigung des Graphits zum Teil anorganische Säuren verwendet. Werden diese nicht ausreichend von der Umwelt abgeschirmt, können diese das Grundwasser belasten.¹⁶³

Eine Alternative stellt der Einsatz von künstlichem Graphit dar. Dieser wird durch Erhitzen von Kohle und Teerrückständen bei hohen Temperaturen und langen Prozesszeiten erzeugt. Dadurch werden die Umwelteinwirkungen durch den zumeist oberirdisch abgebauten Graphit und dessen Aufreinigung vermieden. Außerdem wird die Produktion dadurch vom Erzvorkommen entkoppelt und kann prinzipiell überall auf der Welt aufgebaut werden. Der Einsatz nachwachsender Rohstoffe als Kohlenstoffquelle wird derzeit erforscht. Der CO_2 -Fußabdruck der Produktion hängt dabei maßgeblich vom eingesetzten Energiemix ab. Die für Batterien verwendeten Graphitsorten unterscheiden sich hinsichtlich Performance, Preis und Qualitäts-(Schwankungen). Im Jahr 2018 lag der Marktanteil von künstlichem Graphit in Lithium-

¹⁵⁶ Benny, 2021

¹⁵⁷ Witsch, 2021

¹⁵⁸ KIT, 2020

¹⁵⁹ Bergfreiheit bedeutet die Freiheit jedes Bergbauwilligen, bergfreie Bodenschätze aufzusuchen, unabhängig von der Tatsache, ob ihm der Grund und Boden gehört. Bergfreie mineralische Rohstoffe gehen mit der Erschließung der Lagerstätte und deren Abbau in das Eigentum des dazu Berechtigten über. Der gesamte Vorgang wird durch Gesetze geregelt und untersteht staatlicher Aufsicht.

¹⁶⁰ Deutscher Bundestag, 2021a

¹⁶¹ Am 01.05.2021 hat die bolivianische Regierung die Lithium-Förderkonzessionen für den Salar de Uyuni neu ausgeschrieben (Greis, 2021).

¹⁶² RioTinto, 2021

¹⁶³ Dolega et al., 2020

lonen-Batterien bei etwa 50 %.¹⁶⁴ (siehe auch Rohstoffsteckbriefe im Anhang)

Die rechtliche Verankerung von Sorgfaltspflichten schafft Rechtsklarheit und stärkt die Einhaltung von Menschenrechten

Deutschland ist mit einem Importvolumen von 1.104 Mrd. Euro, nach den USA und China eines der größten Importländer der Welt und kann damit einen erheblichen Einfluss auf die weltweiten Lieferketten ausüben. Bisher war es den Unternehmen in Deutschland freigestellt, Menschenrechtsverletzungen in ihren Lieferketten zu analysieren und Maßnahmen einzuleiten, um die Leitprinzipien der UN für Wirtschaft und Menschenrechte umzusetzen. Eine Umfrage des Nationalen Aktionsplans Wirtschaft und Menschenrechte Mitte 2020 zeigte, dass lediglich 22 % der befragten Unternehmen (mit mehr als 500 Mitarbeitern) die Anforderungen erfüllen.¹⁶⁵

Um die Sorgfaltspflicht gesetzlich zu regeln, hat das Bundeskabinett am 03.03.2021 den Entwurf eines „Gesetzes über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten in Lieferketten“¹⁶⁶ verabschiedet, der am 11.06.2021 vom Deutschen Bundestag als so genanntes „Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz – LkSG“ angenommen und dadurch am 1. Januar 2023 in Kraft treten wird.¹⁶⁷ Ziel des Gesetzes ist es, dass in Deutschland ansässige Unternehmen durch eine Sorgfaltspflicht für die Einhaltung international anerkannter Menschenrechte in den Lieferketten verantwortlich sind. Die Verantwortung erstreckt sich dabei auf die gesamte Lieferkette, wobei der Grad der Verantwortung in der Lieferkette nach dem Grad der Einflussmöglichkeit abgestuft ist. Die Elemente der Sorgfalt gelten dementsprechend für das Unternehmen selbst sowie für seine unmittelbaren Zulieferer. Menschenrechtsrisiken bei mittelbaren Zulieferern müssen dagegen erst analysiert und adressiert werden, wenn das Unternehmen Kenntnis darüber erlangt.

Das nationale Sorgfaltspflichtengesetz soll ab 2023 zunächst nur für große Unternehmen mit mehr als 3.000 Beschäftigten in Deutschland gelten und ab 2024 auf Unternehmen mit mehr als 1.000 Beschäftigten ausgeweitet werden. Erfasst werden Menschenrechtsverletzungen und Umweltrisiken, sofern diese zu Menschenrechtsverletzungen führen, sowie Gesundheits- und Umweltgefahren durch Quecksilber und langlebige organische Schadstoffe, die Bestandteil zweier internationaler Abkommen sind. Mit der Kontrolle und Durchsetzung soll das Bundesamt für Ausfuhrkontrolle (BAFA) beauftragt werden. Bei Verstößen können Buß- und Zwangsgelder verhängt werden. Bei schweren Verstößen ist der Ausschluss von öffentlichen Aufträgen möglich.

Der Vorschlag zur neuen EU Batterieverordnung adressiert die Sorgfaltspflicht von Unternehmen in der Batterielieferkette

Die von der EU vorgeschlagene neue Batterieverordnung adressiert auch die Sorgfaltspflicht. In dem Entwurf sind Anforderungen an das Inverkehrbringen von Batterien festgehalten, die Menschenrechtsverletzungen und negativen Umwelteinflüssen entgegenwirken sowie die Versorgung mit wertvollen Rohstoffen sicherstellen sollen.¹⁶⁸ Es ist u. a. vorgesehen, eine verpflichtende Due-Diligence-Prüfung (Sorgfaltspflicht) für Rohmaterialien in Industrie- und Fahrzeugbatterien einzuführen. In der Verordnung heißt es, dass diese Prüfung grundsätzlich eine Überprüfung durch Dritte über benannte Stellen erfordern wird. Zudem wird darauf verwiesen, dass bereits zahlreiche freiwillige Initiativen wie z. B. Responsible Mining Assurance (IRMA), Responsible Minerals Initiative (RMI) und Cobalt Industry Responsible Assessment Framework (CIRAF) existieren. Freiwillige Bemühungen stellen jedoch möglicherweise nicht sicher, dass alle Wirtschaftsteilnehmer, die Batterien auf den Markt bringen, dieselben Mindestvorschriften einhalten. Deshalb verlangt Artikel 39 zusammen mit Anhang X, dass Sorgfaltspflichten für wieder aufladbare Industriebatterien und Batterien für Elektrofahrzeuge verpflichtend festgelegt werden.

¹⁶⁴ Whiteside & Finn-Foley, 2019; Whiteside & Finn-Foley, 2019

¹⁶⁵ Initiative Lieferkettengesetz, 2020

¹⁶⁶ BMWi, 2021b

¹⁶⁷ Deutscher Bundestag, 2021b

¹⁶⁸ Europäische Kommission, 2020e

Für die Umsetzung der Sorgfaltspflicht wird auf internationale anerkannte Standards verwiesen, wie zum Beispiel die zehn Prinzipien des UN Global Compact,¹⁶⁹ die UNEP Richtlinien für ein soziales Life Cycle Assessment of Products,¹⁷⁰ den OECD-Leitfaden zur Erfüllung der Sorgfaltspflicht für verantwortungsvolles unternehmerisches Handeln¹⁷¹ bzw. den OECD-Leitfaden für die Erfüllung der Sorgfaltspflicht zur Förderung verantwortungsvoller Lieferketten für Minerale aus Konflikt- und Hochrisikogebieten.¹⁷²

Die Sorgfaltspflicht in der Lieferkette soll die am weitesten verbreiteten sozialen und ökologischen Risikokategorien berücksichtigen. Dies betrifft die gegenwärtigen und vorhersehbaren Auswirkungen auf allgemeine Menschenrechte, die menschliche Gesundheit, das Recht auf Gesundheit, die Sicherheit am Arbeitsplatz, die Auswirkungen auf die Umwelt, die Wassernutzung, den Bodenschutz, die Luftverschmutzung, die Artenvielfalt sowie das Leben in der Gemeinschaft.

Darüber hinaus sollen verpflichtende Mindestquoten für das Einsammeln der Batterien, die Rückgewinnungsquoten beim Recycling sowie den Rezyklatanteil in neuen Batterien eingeführt werden, um die Abhängigkeit von primären Rohstoffimporten mit negativen Umweltauswirkungen zu reduzieren.

Der Vorschlag adressiert somit sehr weitreichende Themen der Nachhaltigkeit in Bezug auf Rohstoffe und Kreislaufführung. **Da der Zugang zum EU Binnenmarkt an die Umsetzung der Verordnung geknüpft ist, hat die EU hier ein sehr starkes Instrument geschaffen, die Batterie- sowie ihre Zulieferindustrie nachhaltig zu verändern.**

Unterstützen sollen dabei neue IT-Technologien, wie ein elektronisches Austauschsystem, die mehr Transparenz schaffen und den elektronischen Austausch von Daten über Batterien erleichtern. Die EU möchte bis zum 1. Januar 2026 ein solches System implementieren. Artikel 65 fordert die Einführung einer „elektronischen Akte“ (eines Batteriepasses), die mit dem elektronischen Austauschsystem der EU verknüpft ist. Diese Anforderungen sollen für alle in den Verkehr ge-

brachten Industrie- und Traktionsbatterien (>2 kWh) ab dem Jahr 2026 gelten. Ziel ist es, die Verbraucher:innen und Endnutzer:innen besser zu informieren und eine Marktverschiebung hin zu umweltfreundlicheren Batterien zu fördern. Zusätzlich sollen Wirtschaftsakteure im Bereich Second-Life und Recycling befähigt werden, fundierte Geschäftsentscheidungen zu treffen. Nach dem Willen der EU-Kommission soll ein Batteriepass verpflichtend für Industrie- und Traktionsbatterien eingeführt werden.¹⁷³

2.5 Wirtschaftlichkeit

- Bereits heute weisen zahlreiche **Elektrofahrzeuge günstigere nutzerseitige (TCO-)Kosten** als vergleichbare Verbrenner(-basierte) Pkw auf.
- Bereits **zwischen 2022 und 2024** könnte die **Kostenparität** von E-Pkw mit konventionellen Pkw hinsichtlich Anschaffungspreis erreichen werden.
- **Bereits jetzt** sorgen Kaufprämien **teilweise** für **günstigere Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen** im Vergleich zu Verbrennern.
- Die **Batteriepackkosten** werden sich **bis 2030** voraussichtlich **um weitere bis zu 60 %** gegenüber dem Niveau von 2020 **verringern**.

2.5.1 Der nutzer- und produktionsseitige Kostenvergleich spricht immer deutlicher für batterieelektrische Fahrzeuge

Ein weiterer Aspekt der Nachhaltigkeit in der Batterie(zell)fertigung sind die Kosten von Batteriezellen bzw. -systemen. Lange Zeit waren (bzw. galten) batterieelektrische Fahrzeuge teurer als vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Aber stimmt das bzw. diese Annahme überhaupt noch? Um dies zu klären, sollten bei einem entsprechenden Kostenvergleich stets **zwei Aspekte betrachtet werden: (1) die nutzerseitigen Kosten, also die „total costs of ownership“ (TCO) und (2) die herstellerseitigen Kosten.**

169 UN Global Compact, 2021

170 UN Environment Programme, 2009

171 OECD, 2018

172 OECD, 2019

173 Europäische Kommission, 2020e

Betrachtet man die nutzerseitigen Gesamtkosten (TCO) von Elektrofahrzeugen, also ein Abrechnungsverfahren, das alle anfallenden Kosten der Investition und nicht nur die Anschaffungskosten berücksichtigt, sondern darüber hinaus alle Aspekte der späteren Nutzung (Energiekosten, Reparatur und Wartung), zeigt sich, dass bereits heute zahlreiche Elektrofahrzeuge günstigere TCO als vergleichbare Pkw mit Verbrennungsmotor aufweisen.

Elektrofahrzeuge sind in der Anschaffung derzeit noch teurer als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, aber die Kostenparität ist in Sicht

Nimmt man zunächst nur die reinen Anschaffungskosten in den Blick, dann wird deutlich, dass die derzeitigen Listenpreise für batterieelektrische Fahrzeuge meist noch erkennbar über denen vergleichbarer Verbrenner liegen. Hauptgründe hierfür sind die noch höheren Produktionskosten, die vorwiegend auf die Batterieherstellung zurückzuführen sind.

Aktuelle Analysen prognostizieren jedoch, dass hinsichtlich des Anschaffungspreises eine Kostenparität zwischen Elektrofahrzeugen und vergleichbaren konventionellen Pkw bereits zwischen 2022 und 2024 erreichbar wird. Ursächlich dafür sind der beschleunigte Markthochlauf von E-Fahrzeugen und die damit verbundenen Lern- und Skaleneffekte in der Batteriezellproduktion.¹⁷⁴

Kaufprämien sorgen derzeit teilweise schon für günstigere Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Verbrennern

In Deutschland wurde im Juni 2020 im Zuge des coronabedingt aufgelegten Konjunkturpaketes der Bundesregierung die Prämie für Käufer:innen eines Elektroautos (der sog. „Umweltbonus“) bis Ende 2021 auf bis zu 9.000 Euro erhöht. Dadurch konnte die Preisdifferenz zwischen Elektroautos und Verbrennern nicht nur signifikant reduziert werden, sondern

hat teilweise dazu geführt, dass manche Elektrofahrzeuge dadurch günstigere Anschaffungskosten als vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor aufweisen.¹⁷⁵ So kostete im Frühjahr 2021 z. B. die Grundversion des VW ID.3 abzüglich des erhöhten Umweltbonus bereits weniger als ein vergleichbarer VW Golf mit Benzin- oder Dieselmotor.¹⁷⁶

Die Berücksichtigung sämtlicher Aufwendungen ist für einen echten Kostenvergleich nötig

Um jedoch zu einer möglichst umfassenden Einschätzung der nutzerseitigen Kosten zu kommen, werden bei einer TCO-Betrachtung neben den Anschaffungskosten *sämtliche Aufwendungen* mit in die Kalkulation einbezogen, die bei der Nutzung anfallen. Dies beinhaltet insbesondere

- Kosten für Versicherung,
- Kfz-Steuer,
- Ausgaben für Wartung und Reparaturen,
- Reifenverschleiß,
- Kraftstoff/Stromkosten und
- eine Pauschale für die Wagenwäsche /Wagenpflege.

Ein erheblicher Teil wird zudem durch den Wertverlust bestimmt, d.h. die Summe, die für die Anschaffung eines Fahrzeuges ausgegeben wurde, abzüglich eines durchschnittlichen Restwertes des Pkw. Hierzu gibt es zahlreiche Untersuchungen. So hat etwa der ADAC im Juli 2020 einen entsprechenden Vergleich vorgenommen. Im Ergebnis schnitten die meisten der analysierten Elektrofahrzeuge (auch Hybride) günstiger hinsichtlich der nutzerseitigen Kosten ab als vergleichbare Benziner oder Dieselfahrzeuge.¹⁷⁷ Eine Gegenüberstellung der TCO von The Mobility House von zwei vergleichbaren Fahrzeugmodellen eines Herstellers, einmal als Elektrofahrzeug und einmal als Benziner, führte zu ähnlichen Resultaten.¹⁷⁸ Dies zeigt auch die Gegenüberstel-

174 Thielmann et al., 2020

175 Verivox, 2020

176 ADAC, 2021d

177 Als Grundlage der Berechnungen wurde (u.a.) von einer durchschnittlichen Haltedauer von 5 Jahren mit einer Jahresfahrleistung von 15.000 Kilometern ausgegangen. Zudem wurden als Kraftstoffpreise für Normal/Super 1,28 €, für SuperPlus 1,36 €, für Diesel 1,10 € je Liter, 0,36 €/kWh in Bezug auf Strom, 9,5 € je kg Wasserstoff, durchschnittliche Standardtarife für KFZ-Versicherungen (Haftpflicht und Vollkasko), aktuelle KFZ-Steuern sowie die aktuellen Kaufprämien für Elektrofahrzeuge und Plug-In-Hybride zugrunde gelegt (ADAC, 2021e).

178 Dabei wurden der Hyundai IONIQ Elektro Trend mit dem Hyundai i30 1.4 T-GDI Trend DCT verglichen, wobei als Kostenfaktoren der Anschaffungspreis, die Ladeinfrastruktur für das Elektrofahrzeug, Förderungen und Steuervergünstigungen, der Verbrauch, die KFZ-Steuer, die Fahrzeugversicherung, Wartung, Service und Verschleißteile sowie der Restwert mit in den Vergleich eingingen. Insgesamt schnitt dabei die Elektrovariante bzgl. TCO leicht besser als der Benziner ab (The Mobility House, 2020).

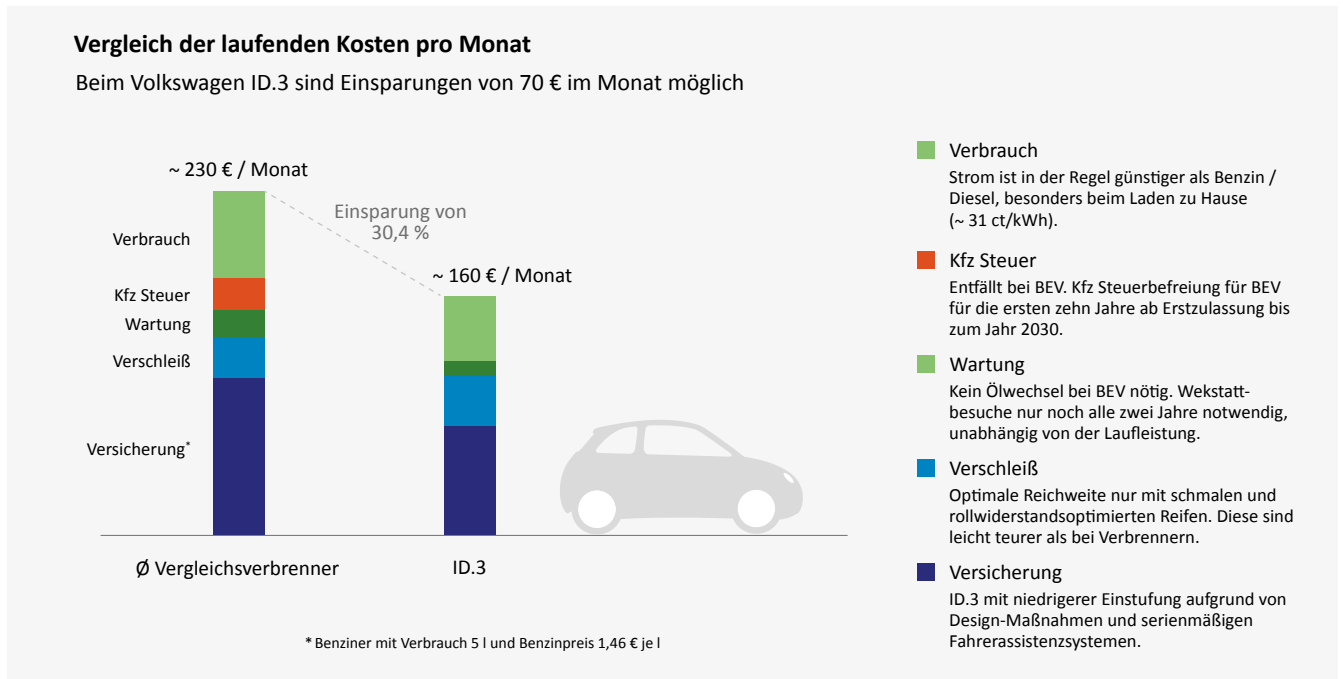


Abbildung 8: Vergleich der laufenden Kosten zwischen E-Pkw und Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, gemäß Volkswagen, 2020c.

lung der laufenden Kosten des Elektrofahrzeugs ID.3 von VW mit einem Vergleichsverbrenner in Abbildung 8.

Die Produktion von Elektrofahrzeugen weist ein hohes Kostensenkungspotenzial auf

Auch wenn die TCO von Elektrofahrzeugen vielfach schon geringer sind als bei einem vergleichbaren Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, **so ist die stetige Reduzierung der produktionsseitigen Kosten ein wichtiger Schritt hin zu einem nachhaltigen Kostenvorteil von Elektrofahrzeugen** – zumal die staatliche Bezuschussung des Anschaffungspreises über den sog. Umweltbonus nicht dauerhaft gewährt werden wird.

Die hersteller- bzw. produktionsseitigen Kosten bieten insbesondere in Bezug auf die Batterie, die derzeit mit etwa 20-30% der Gesamtkosten eines EV eine der größten Kostenpositionen ist, ein deutliches Reduzierungspotenzial. Laut

Prognosen werden die Batteriepackkosten zwischen 2020 und 2023 von 137 USD/kWh auf 101 USD/kWh und bis 2030 voraussichtlich bis auf 56-58 USD/kWh sinken (siehe Abbildung 9).¹⁷⁹ Gründe hierfür sind neben Skaleneffekten infolge einer entsprechend steigenden Nachfrage durch den weltweiten Hochlauf der Elektromobilität, optimierte Kathoden- und Anodenmaterialien (und dadurch höheren Energiedichten) sowie weitere Material- und Prozessinnovationen.¹⁸⁰

In Bezug auf eine ökonomisch wie ökologisch nachhaltige Batteriezellproduktion streben deutsche und europäische Hersteller vermehrt eine Batteriezellproduktion in Europa an. Dies resultiert u. a. daraus, dass ein Zukauf von Zellen meist einen Kostennachteil bedeutet, kein Zell-Know-how aufgebaut werden kann und eine Abhängigkeit bezüglich Lieferterminen und Zellqualität besteht.¹⁸¹ Für die Produktion vor Ort spricht zudem die gesicherte Nachfrage durch gefestigte Lieferbeziehungen, räumliche Nähe zu den Abnehmern

¹⁷⁹ Laut BNEF lag der Anteil des Batteriepacks im Jahr 2020 noch bei rund 21% der Gesamtkosten eines Elektrofahrzeugs (BNEF, 2020). Laut Lutsey & Nicholas (2019) lag dieser Anteil im Jahr 2017 bei rund 30% und wurde für 2025 bei ebenfalls 30% veranschlagt.

¹⁸⁰ Thielmann et al., 2017

¹⁸¹ Köllner, 2019

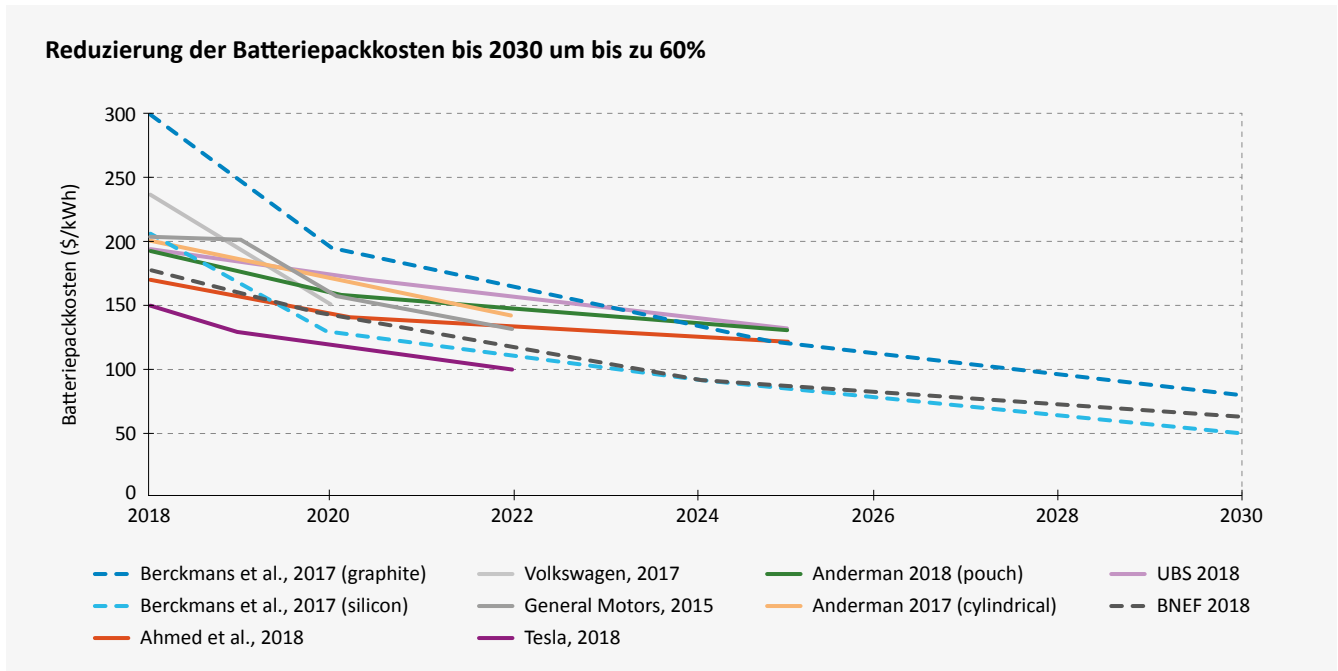


Abbildung 9: Prognostizierte Kostenentwicklungen der Batteriepackkosten bis 2030 (gemäß Lutsey/Nicholas 2019).

und OEMs sowie qualifiziertes Personal (vgl. Kapitel 2.6.1). Wettbewerbsentscheidende Alleinstellungsmerkmale könnten künftig durch höhere Energiedichten, Schnellladefähigkeit, geringere Kosten und eine nachhaltige Produktion, zum Beispiel durch einen verstärkten Einsatz von erneuerbaren Energien, geschaffen werden.¹⁸²

Stimuliert wird der Aufbau einer europäischen Batteriezellfertigung auch durch die derzeitigen Wachstumsprognosen: Je nach Studie wird der Anteil von E-Pkw an den globalen Neuzulassungen im Jahr 2030 voraussichtlich zwischen 25 und 75 % liegen, was eine Batterienachfrage von 1 bis 6 TWh jährlich bedeutet (siehe dazu auch Abbildung 10).¹⁸³

Für eine europäische Batteriezellfertigung spricht insbesondere, dass derzeit rund 40 % der Wertschöpfung eines Elektroautos auf die Batterie entfallen¹⁸⁴, wobei 60 bis 80 %

der Wertschöpfung am Batteriesystem durch die Zellen bestimmt wird.¹⁸⁵

Anfang 2021 lag die jährliche Produktionskapazität in Europa bei 30 Gigawattstunden. Im Hinblick auf den enorm ansteigenden Batteriebedarf weist eine Batteriezellfertigung in Europa ein erhebliches Wertschöpfungspotenzial auf. Zudem entstehen logistische und wirtschaftliche Risiken, wenn große Volumina für die Serienproduktion über lange Distanzen zugeliefert werden. Die Nähe zu den Produktionsstandorten ist folglich von Vorteil. Folgt man den Prognosen des Hochlaufs der Elektromobilität,¹⁸⁶ dann decken die aktuell angekündigten Produktionskapazitäten für Batteriezellen in Europa kaum die zukünftigen Marktbedarfe ab. Für die Zukunft der Elektromobilität ist daher der Auf- und Ausbau der Batteriezellfertigung in Europa wirtschafts- und industriepolitisch von großer Bedeutung.

182 Köllner, 2021

183 Köllner, 2021; Thielmann et al. 2020; Thielmann et al., 2018

184 Volkswagen, 2019b

185 ElektroMobilität NRW, 2020

186 Gemäß einer Studie von Ernst & Young wird bis 2030 mit bis zu 40 Mio. Elektrofahrzeugen (inkl. PHEV) in Europa gerechnet (Colle et al., 2021). Der EV Outlook der IEA erwartet im Jahr 2030 für Europa rund 13 Mio. jährliche Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen (inkl. PHEV) (IEA, 2021).

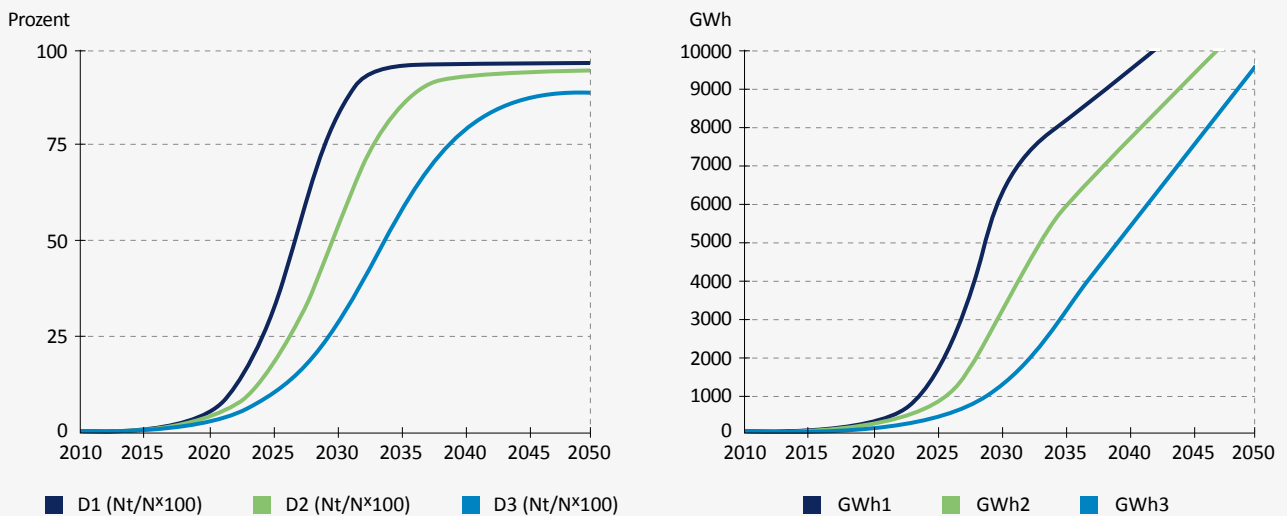
Dies zeigt sich insbesondere an den bereits umgesetzten, im Aufbau bzw. in Planung befindlichen Batteriezellproduktionsstandorten in Deutschland und Europa. Die aktuellste Marktanalyse der wissenschaftlichen Begleitung zur Fördermaßnahme Batteriezellfertigung zeigt, dass die jährliche Produktionskapazität in Europa im Jahr 2030 voraussichtlich zwischen 697 und 959 GWh erreichen wird und der Anteil aus der Produktion am Standort Deutschland 25 bis 32% ausmachen wird. Grundsätzlich sind durch einen solch massiven Aus- bzw. Aufbau an Produktionskapazitäten starke Skaleneffekte sowie eine Verringerung der Produktionskomplexität zu erwarten – mit entsprechendem Effekt auf die

Batterie- und damit auf die Herstellungskosten von Elektrofahrzeugen.

Neue Zell- und Fertigungstechnologien sowie eine Integration der Zellen in das Fahrzeug werden zu erheblichen Kostensenkungen führen

Der US-Elektroautobauer Tesla kündigte im Herbst 2020 an, die Batteriesystemkosten bis ca. 2024/2025 durch Verbesserungen im Zelldesign, im Fertigungsprozess, der Elektroden und der Fahrzeugintegration um bis zu 56% gegenüber dem gegenwärtigen Preisniveau senken zu können. Damit würde ein Preiskorridor von rund 50 USD/kWh erreicht bei gleich-

Prognostizierte Entwicklung der globalen E-Pkw-Neuzulassungen & LIB-Bedarf bis 2050



Szenario D3/GWh3 entspricht dabei den Zielen des Pariser Klimaabkommens von 2015. Szenario D2/GWh2 führt zu einer deutlich schnelleren Ausbreitung der E-Pkw mit einer (nahezu) vollständigen globalen Durchdringung bereits um 2040 und einer globalen Batterienachfrage von 3 bis 8 TWh zwischen 2030 und 2040 und geht von äußeren Faktoren wie deutlichen politischen Maßnahmen aus (Gesetzgebung, Marktanreize, Elektrofahrzeug-Quoten, Verbrennerverbote etc.), welche auf die Diffusion Einfluss nehmen. Szenario D1/GWh1 wiederum ergibt sich auf Basis der aktuellsten Verkaufszahlen von BEV und PHEV und beschreibt eine politisch intendierte aber dabei zugleich von OEM mit unterstützter Entwicklung, in welcher aus einer zunächst durch Lieferengpässe und beschränktem Angebot geprägten Phase sich zunehmend eine attraktive Elektromobilität mit breitem Angebot und wachsender Nachfrage entwickelt.ⁱ

ⁱ Thielmann et al., 2018

Abbildung 10: Abschätzungen der globalen E-Pkw-Neuzulassungen in % und sich daraus ergebender LIB-Bedarf in GWh jeweils bis 2050, gemäß Thielmann et al., 2018.

zeitiger Steigerung der Reichweite der Elektrofahrzeuge um

bis zu 54%.¹⁸⁷ Auch VW kündigte im März 2021 ähnliche Kostensenkungsziele in Bezug auf die Batteriesysteme an, die insbesondere durch die geplante Eigenfertigung der Zellen, durch die Einführung einer sog. Einheitszelle ab 2023, Optimierung des Zelltyps, innovative Produktionsmethoden und das konsequente Recycling der Zellen erreicht werden sollen.¹⁸⁸

Batterieinnovationen senken nicht nur die Kosten, sondern erhöhen auch die Nutzungsfreundlichkeit und Akzeptanz von Elektroautos

Neben der prognostizierten deutlichen Verringerung der Kosten insbesondere der Batteriezellen, tragen technologische Fortschritte auch zu einer Erhöhung der Reichweite der Elektrofahrzeuge bei und steigern dadurch deren Nutzungsfreundlichkeit. So hat etwa Mercedes mit dem EQS, dem ersten Modell auf Basis der eigens entwickelten Elektro-Plattform EVA, Reichweiten von bis zu 770 Kilometern (gemäß WLTP-Zyklus) und verkürzte Ladezeiten von rund einer halben Stunde für 80% Batteriekapazität (bzw. 15 Minuten für 300 WLTP-Kilometer) angekündigt.¹⁸⁹ Von ähnlichen Reichweiten spricht auch der E-Pkw-Konstrukteur Lucid hinsichtlich seines Modells Air, das bis zu 832 Kilometer weit mit einer Batterieladung kommen und in nur 20 Minuten Strom für 300 Meilen (482 Kilometer) über ein 900-Volt-System nachladen können soll.¹⁹⁰

Die dadurch zu erwartende deutlich verbesserte Nutzungsfreundlichkeit durch deutlich größere Reichweiten und kürzere Ladedauer dürfte sich zudem auch positiv auf die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen auswirken. Die so genannte „Reichweitenangst“ ist meistens aber ohnehin unberechtigt: Nur etwas mehr als ein Prozent der Pkw-Fahrten ist weiter als 100 Kilometer (auch wenn Pkw-Fahrer:innen bei der Kaufentscheidung eines Fahrzeugs häufig Erwartungen an die Pkw-Nutzung im Fernverkehr miteinbeziehen). Außer-

dem wird der Reichweitenangst neben der Entwicklung leistungsstärkerer und schnellladefähiger Batterien auch durch den Ausbau öffentlicher Ladestellen begegnet. Eine Million Ladepunkte hat sich die Bundesregierung bis 2030 zum Ziel gesetzt, für dann prognostizierte zehn Millionen E-Autos in Deutschland. Wie viele öffentlich zugängliche Ladepunkte zukünftig notwendig sein werden, ist nicht sicher, da einerseits schneller werdende Ladevorgänge bedeuten, dass an einem Ladepunkt mehr Fahrzeuge pro Tag bedient werden können, und andererseits ein Großteil der Ladevorgänge auch zukünftig zu Hause stattfinden wird. Insbesondere da die Kosten für den Ladenanschluss zu Hause (Wallbox) seitens der Bundesregierung seit November 2020 mit 900 Euro bezuschusst werden, was in vielen Fällen den Großteil der Kosten für Kauf und Installation abdeckt. Diese Förderung wird seitens der E-Auto-Fahrer:innen stark nachgefragt: Allein zwischen Ende November 2020 und Ende März 2021 wurden insgesamt 377.500 Anträge zur Förderung einer privaten Ladestation gestellt.^{191 192}

187 Hinsichtlich Zelldesign plant Tesla die Einführung einer neuen Rundzelle (4680) mit sechsfacher Leistung und fünffacher Energiemenge im Vergleich zu einer aktuellen Tesla-Zelle bei einem gleichzeitig beschleunigten Produktionsprozess. Dies wiederum soll einen deutlich höheren Jahresausstoß an Zellen ermöglichen. Außerdem wird bzgl. der Zellchemie Silizium in der Anode zum Einsatz kommen, was die Zellkosten weiter senken soll. Bzgl. der Kathode soll auf Kobalt verzichtet werden, was ebenfalls Kosten einsparen soll. Zudem wurde für 2021 der Beginn des firmeneigenen Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien in Nevada angekündigt (Schaal, 2020f; P3, 2020).

188 Volkswagen, 2021b

189 Schaal, 2021a

190 Schaal, 2020g

191 Götz, 2021

192 Nobis & Kuhnimhof, 2018

2.6 Beschäftigung

2.6.1 Batterie(zell)produktion kompensiert den Beschäftigungsrückgang in der Automobilwirtschaft

- Die Automobilindustrie befindet sich in einem **tiefgreifenden Transformationsprozess** und sieht sich mit starken Absatzrückgängen infolge der Covid-19-Pandemie konfrontiert.
- Insbesondere durch Nachfragerückgänge im heimischen Markt und arbeitsplatzsparende technische Fortschritte in der Herstellung ist mit einer kurz- und mittelfristigen **Abnahme der Zahl der Beschäftigten** in der Automobilwirtschaft in Deutschland zu rechnen.
- Die Transformation der Automobilindustrie führt zu einer **Reorganisation der Wertschöpfung** und zu einer Verschiebung der Bedarfe an Arbeitskräften in der Automobilwirtschaft.
- In der Batteriezellfertigung entstehen zahlreiche **neue Arbeitsplätze**, die einen hohen Qualifizierungsbedarf mit sich bringen.

Die Automobilindustrie hat eine hohe Bedeutung für Wohlstand und Beschäftigung in Deutschland, befindet sich aber im Wandel

Im Jahr 2019 erwirtschafteten die Unternehmen der deutschen Automobilindustrie einen Umsatz von gut 436 Milliarden Euro und beschäftigten etwa 847.600 Personen direkt.¹⁹³ Unter Berücksichtigung der 643.000 Beschäftigten im sekundären Markt zum Beispiel für Ersatzteile (Aftermarket) und im Handel sowie der 654.000 Beschäftigten bei Zulieferern anderer Branchen und im Bereich Dienstleistungen beschäftigt die Automobilwirtschaft insgesamt 2,2 Millionen Menschen (etwa sieben Prozent der sozialversicherungspflichtigen Arbeitsplätze in Deutschland) und ist damit der beschäftigungsstärkste Industriezweig des Landes.¹⁹⁴

Rückläufige Produktionszahlen in Deutschland seit 2016, insbesondere bei Fahrzeugen mit Dieselmotor, die derzeitige Transformation der Produktion hin zu vernetzten, autonomen, geteilten und elektrischen Fahrzeugen (häufig unter dem Akronym CASE zusammengefasst, das für „Connected, Autonomous, Shared, Electric“ steht) und nicht zuletzt der weltweite Absatzrückgang infolge der Covid-19-Pandemie rufen Umgestaltungen der Arbeitsplätze hervor. In 2019 wurden in der deutschen Automobilindustrie bereits rund 11.000 Arbeitsplätze abgebaut (-1,3%). Im Juli 2020 waren 801.653 Menschen in der Automobilindustrie beschäftigt, dies ist ein weiterer Rückgang um 2,6% (21.220 Arbeitsplätze) innerhalb von nur acht Monaten.¹⁹⁵

Die Zahl der Beschäftigten in der deutschen Automobilwirtschaft wird weiter abnehmen

Die Automobilindustrie befindet sich in einem tiefgreifenden Transformationsprozess und sah sich bereits vor der Covid-19-Pandemie mit disruptiven Trends wie Elektromobilität, autonomem Fahren, hoch automatisierten Fabriken und Shared Mobility konfrontiert. Laut Untersuchungen von gaggemini werten Automobilunternehmen neben CASE zunehmend folgende drei Aspekte als entscheidend für ihre Zukunft: Nachhaltigkeit, Kundenzentrierung und intelligente Industrie.¹⁹⁶ Den Unternehmen ist bewusst, dass sie moderne, nachhaltige Fahrzeuge herstellen und sich zeitgleich in einem Mobilitäts-Ökosystem positionieren müssen.

Seit 2019 stellte die Covid-19-Pandemie die Automobilindustrie vor eine zusätzliche Herausforderung. Im Jahr 2020 ist der weltweite Absatz von Personenkraftwagen (Pkw) eingebrochen und deren globale Produktion infolge dessen um 17% gesunken.¹⁹⁷ In Europa gingen die Verkaufszahlen 2020 um etwa 25% zurück. Gleichermäßen nahm auch die Produktion von Pkw in Deutschland ab. Mit gut 3,5 Mio. Fahrzeugen lag die Produktion deutscher Hersteller 2020 für den inländischen Markt mit 24,6% unterhalb des Vorjahreswerts.¹⁹⁸ Auch beim Export ist mit gut 2,6 Mio. Pkw in 2020 ein Rückgang im Vergleich zum Vorjahr in Höhe von 24% zu

¹⁹³ Falck et al., 2021

¹⁹⁴ BMWi, 2021c

¹⁹⁵ BMWi, 2020a

¹⁹⁶ Winkler & Mehl, 2021

¹⁹⁷ Statista, 2021

¹⁹⁸ VDA, 2021a

konstatieren. Gleichwohl waren die Inlands- und Exportproduktion deutscher Pkw-Hersteller auch vor der Pandemie rückläufig. Im Jahr 2019 betrug das Produktionsvolumen etwa 75 % (Inland) bzw. 79 % (Export) von dem im Jahr 2016.

Durch den derzeit starken Absatzzuwachs in China erholt sich die Industrie langsam von dem krisenbedingten Absatzrückgang.¹⁹⁹ In den kommenden Jahren wird die Nachfrage nach individuellen Mobilitätslösungen laut einer aktuellen Analyse von Roland Berger weiter steigen.²⁰⁰ Bis 2030 wird erwartet, dass das Volumen der weltweit verkauften Pkw und leichten Nutzfahrzeuge um 15 % höher sein wird als derzeit. Hervorgerufen wird dieses Wachstum allerdings vor allem von asiatischen Märkten, und hier vor allem von China (+32 %). Sowohl in Deutschland, als auch Westeuropa, dem wichtigsten Exportmarkt der deutschen Automobilindustrie, wird es jedoch zu einem Rückgang der Pkw-Nachfrage kommen.²⁰¹ Trotz der langsamen Erholung lagen die inländischen Produktionszahlen deutscher Pkw-Hersteller auch im ersten Quartal 2021 mit 8 % (Inland) und 9 % (Export) erneut unter dem Niveau des ersten Quartals des Vorjahres.²⁰²

Infolge des signifikanten Produktionsrückgangs, aber insbesondere auch durch arbeitsplatzsparende technische Fortschritte in der Herstellung, ist mit einer kurz- und mittelfristigen Abnahme der Zahl der Beschäftigten in der Automobilwirtschaft in Deutschland zu rechnen. Durch digitale Technologien in der Produktion, die Automatisierung repetitiver manueller Tätigkeiten sowie automatisierte und fahrerlose Transportfahrzeuge in der Logistik wird der Bedarf an Arbeitskräften abnehmen. Laut einer auf von VW bereitgestellten Daten beruhenden Analyse wird beispielsweise der durchschnittliche Bedarf an Mitarbeitenden in der Fahrzeugfertigung (bei VW) allein durch den arbeitsplatzsparenden technischen Fortschritt bis zum Jahr 2029 um 12 % sinken.²⁰³ Diese Effizienzsteigerung bei prozess- und standortspezifischen Faktoren ist grundsätzlich unabhängig von

der Antriebstechnologie der zu produzierenden Fahrzeuge, lässt sich aufgrund der weniger komplexen Prozesse bei der Produktion von BEV jedoch schneller umsetzen.

Längerfristig werden zudem Trends wie Shared Mobility und auch fahrerlose Mobilitätsangebote zu einem weiteren Rückgang in der Nachfrage nach Pkw und damit zu einer weiteren Abnahme an Arbeitsplätzen in der deutschen Automobilwirtschaft führen.²⁰⁴ Laut Hagedorn et al. wird die Einführung automatisierter Fahrfunktionen in Verbindung mit Shared Mobility-Konzepten sowohl zu einer Veränderung der Nachfrage nach Personenkilometern als auch des Modal Split führen. In allen untersuchten Szenarien kommt es bis 2030 zu einer Verschiebung von im privaten Pkw zurückgelegten Kilometern zu solchen, die über Sharing-Konzepte zurückgelegt werden: Ein Trend im Nutzungsverhalten, der ebenfalls von McKinsey erwartet wird. Noch vor der COVID-19-Krise äußerten demnach 6 % der Baby-Boomer (geburtenstarke Generation in den Jahren 1945 bis 1965) eine Präferenz für Miet- und Ridesharing-Produkte. In der Generation Y, d. h. derjenigen, die im Zeitraum der frühen 1980er bis zu den späten 1990er Jahren geboren wurden, liegt der Anteil bereits bei 34 %.²⁰⁵

Die Transformation der Automobilindustrie führt zu einer Reorganisation der Wertschöpfung und zu einer Änderung der Bedarfe an Arbeitskräften

In der deutschen Automobilindustrie hängen aktuell 49,8 % der Arbeitsplätze (rund 422.100) direkt mit der Produktion von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICEV) zusammen. Das ifo-Institut hat basierend auf dem zukünftigen Anteil von emissionsarmen Fahrzeugen an der Gesamtproduktion, der notwendig sein wird, um die Flottengrenzwerte der EU einzuhalten, abgeschätzt, dass zwischen 147.700 (17,4 %) und 198.400 (23,4 %) Arbeitsplätze in der Automobilindustrie infolge der entsprechenden Abnahme der Produktion von ICEV bis 2030 wegfallen werden (Visualisierung in Ab-

199 Manager Magazin, 2021

200 Bernhart & Mogge, 2021

201 Hagedorn et al., 2019

202 VDA, 2021a

203 Herrmann et al., 2020

204 Hagedorn et al., 2019

205 Hofstätter et al., 2020

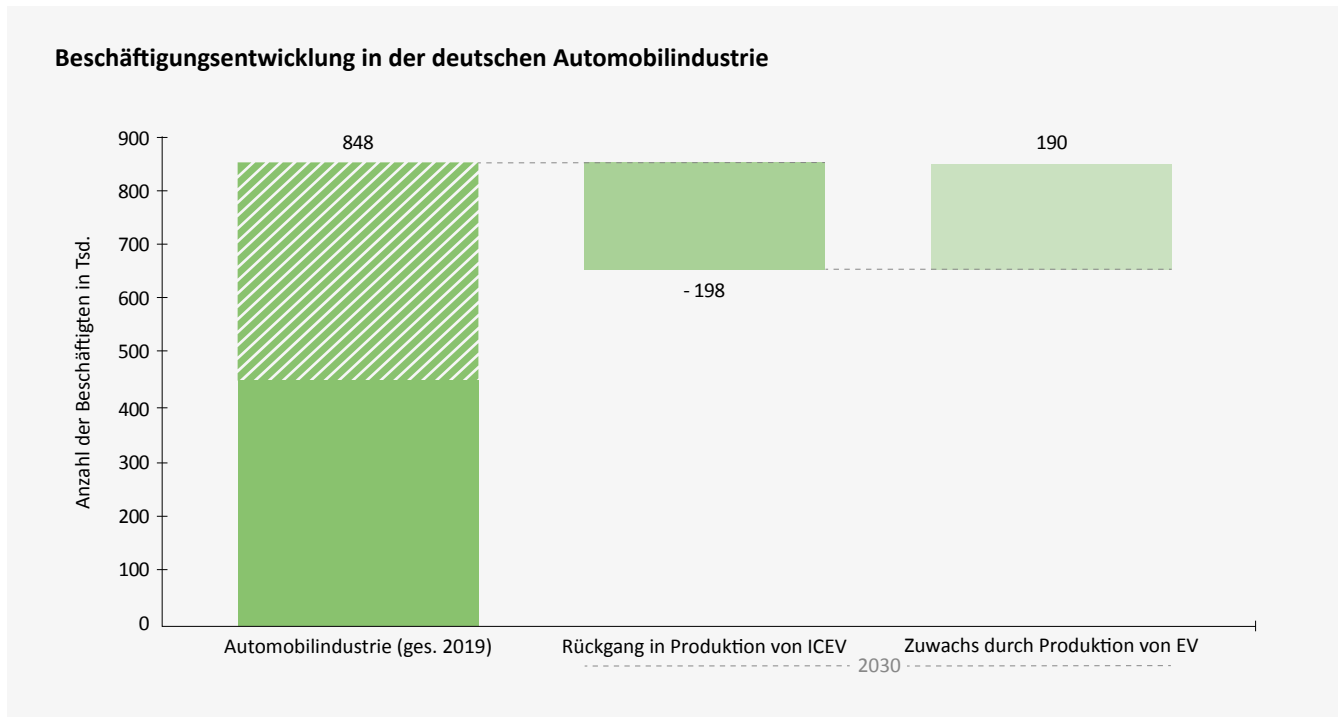


Abbildung 11: Bilanz der Beschäftigung in der Automobilindustrie ausgehend von etwa 848 Tsd. Beschäftigten in 2019, von denen rund 422 Tsd. direkt mit der Herstellung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor verbunden sind (schraffierter Bereich). Rückgang bis 2030 nach Schätzung des ifo-Instituts durch Steigerung des Anteils von EV auf 47%. Zunahme auf Basis der Erkenntnis der Boston Consulting Group, dass bei der Produktion von BEV derzeit etwa 4% weniger Arbeitsstunden bei den OEM anfallen. Eigene Darstellung gemäß Falk et al., 2021 und Niese et al., 2021.

bildung 11).²⁰⁶ Zu der Anzahl an notwendigen Arbeitsplätzen für die Produktion der veranschlagten 35 bis 47% emissionsarmen Fahrzeuge werden keine Angaben gemacht.

Ein von der Boston Consulting Group durchgeführter aktueller Vergleich aller Arbeitsschritte der Fahrzeugfertigung zeigt, dass die Fertigung von BEV grundsätzlich mit etwa 1% weniger Arbeitsstunden nur geringfügig weniger Arbeitskräfte erfordert als die eines vergleichbaren ICEV.²⁰⁷ Allerdings erfolgt die Produktion der Batteriezellen und der Leistungselektronik derzeit nicht durch die Automobilhersteller, sondern durch Zulieferer. Infolgedessen fallen auf Seiten der OEM bei der Produktion von BEV etwa 4% weniger Arbeitsstunden an (vgl. Abbildung 11). Für den Fall, dass die OEM alle Komponenten des Antriebsstrangs und der Leistungselektronik

einschließlich der Batteriezellen selbst produzierten, würden die Arbeitsstunden pro Fahrzeug laut der Untersuchung um 7 Prozentpunkte ansteigen.

Um die Beschäftigung und den damit verbundenen Wohlstand zu erhalten, muss ein Großteil der Wertschöpfung bei der Produktion von Fahrzeugen auch weiterhin in Deutschland stattfinden. Bisher werden zentrale Komponenten der Elektrofahrzeuge wie Batterie(zelle)n größtenteils importiert.²⁰⁸ Wäre Deutschland in der Lage, sowohl den Markt stärker mit inländisch produzierten BEV als auch mit inländisch produzierten Traktionsbatteriezellen zu versorgen, könnte durchaus sogar ein positiver Wachstums- und Beschäftigungseffekt auch in der langen Frist erreicht werden.²⁰⁹

²⁰⁶ Falck et al., 2021

²⁰⁷ Küpper et al., 2020

²⁰⁸ NPM, 2020

²⁰⁹ Mönnig et al., 2018

Eine Analyse der möglichen Auswirkungen der Elektromobilität auf die Beschäftigung in Deutschland durch die NPM unterstreicht den dringenden Handlungsbedarf. Sie kommt zu der Schlussfolgerung, dass die Auswirkungen auf die Beschäftigungsstrukturen erheblich ausfallen, wenn sich die Wettbewerbslage der deutschen Industrie im Bereich Elektromobilität in den kommenden Jahren nicht verbessert und der Importbedarf für Batteriezellen und Elektrofahrzeuge mit dem Markthochlauf weiterwächst.²¹⁰

Der Markthochlauf der Elektrofahrzeuge schafft eine Vielzahl an neuen Arbeitsplätzen

Trotz des coronabedingt starken Rückgangs der Autoverkäufe in Europa im Jahr 2020, hat sich die Gesamtzahl der in Europa im gleichen Zeitraum verkauften Elektroautos (batterieelektrisch, BEV und Plug-in-Hybrid, PHEV) mehr als verdoppelt. Nicht zuletzt aufgrund des EU Flottengrenzwerts stieg auch das Angebot an Elektroautos zuletzt deutlich an. Laut Herstellerangaben wird sich dieser Trend noch weiter fortsetzen.

Durch den Markthochlauf der Elektrofahrzeuge induziert, ist die weltweite Nachfrage nach Batterien, insbesondere Lithium-Ionen-Batterien, von über 20 GWh im Jahr 2010 (fast ausschließlich für Verbraucheranwendungen) auf ca. 250 GWh im Jahr 2020 gestiegen (über 70% davon für Elektrofahrzeuge) und wird voraussichtlich auf mindestens 2–3 TWh im Jahr 2030 steigen.²¹¹ Die aktuellste Marktanalyse der wissenschaftlichen Begleitung der Fördermaßnahme Batteriezellfertigung zeigt, dass die jährliche Produktionskapazität in Europa im Jahr 2030 zwischen 697 und 959 GWh liegen und der Anteil aus der Produktion am Standort Deutschland 25% bis 32% betragen wird.²¹²

Laut des Berichts über eine nachhaltige Batteriewertschöpfungskette erwartet das Weltwirtschaftsforum (WEF), dass bis 2030 weltweit insgesamt 10 Millionen Arbeitsplätze in der Batteriewertschöpfungskette geschaffen werden.²¹³ In verschiedenen Studien wird der direkte Bedarf an Beschäftigten, der aus der Errichtung einer Produktionsanlage mit einer jährlichen Produktionskapazität von 32 GWh resultiert, auf 2.900 und 5.800 und etwa 3,7 bis 7,5-mal mehr indirekt entlang der Batteriewertschöpfungskette geschätzt.^{214 215} Umgerechnet ergibt dies 90 bis 180 direkte Arbeitsplätze in der Batterieproduktion pro GWh und 350 bis 1.400 indirekte Arbeitsplätze entlang der Batteriewertschöpfungskette. Eine vom Fraunhofer ISI durchgeführte Berechnung ergab maximal 90 direkte und über 400 indirekte Arbeitsplätze für eine Produktion geringer Kapazität. Deren Berechnungen für eine skalierte Batterieproduktion von etwa 1.000 GWh (mögliche jährliche Produktionskapazität in Europa 2030) ergeben etwa 250 direkte und indirekte (vorgelagerte) Arbeitsplätze pro GWh.²¹⁶ Bezogen auf die jährliche Produktionskapazität in Europa im Jahr 2030 entstehen demnach etwa 175.000 bis 240.000 Arbeitsplätze.

Exemplarisch werden in Europa bis 2030 folgende neue Arbeitsplätze im Bereich der zentralen Komponente Batterie für BEV entstehen:

- Etwa 72.000 neue Arbeitsplätze in der Zellfertigung und Batterieherstellung.²¹⁷ Zahlreiche großskalige Zellfabriken sind bereits angekündigt oder im Bau.
- Neue Arbeitsplätze in der Aufbereitung von Rohstoffen. Auf der Stufe Aktivmaterialherstellung erfolgt laut Roland Berger derzeit keine Wertschöpfung in Europa. Mehrere Investitionen in diesem Bereich wurden jedoch bereits angekündigt.²¹⁸ BASF errichtet bspw. aktuell eine Katho-

210 NPM AG4, 2020

211 Thielmann et al., 2021

212 VDI/VDE-IT, tbp

213 World Economic Forum Report, 2019

214 NPE, 2016

215 JRC, 2017

216 Thielmann et al., 2021

217 Plattform EM, 2020

218 Roland Berger, 2018

denproduktion, durch die laut IHK in einem ersten Schritt bis zu 200 neue Arbeitsplätze entstehen.²¹⁹

- Gewinnung von Sekundärrohstoffen durch Recycling. Pro tausend Tonnen Lithium-Ionen-Batterie-Abfall werden etwa 15 Arbeitsplätze für die Sammlung, den Abbau und das Recycling dieser Batterien entstehen. Hier entstehen bis zu 6.500 Arbeitsplätze in Europa bis 2030.²²⁰

In der Strategischen Forschungsagenda für Batterien 2020 wird hervorgehoben, dass die richtigen Fähigkeiten unerlässlich sind, um eine hochqualifizierte Belegschaft entlang der gesamten Batteriewertschöpfungskette zu entwickeln und zu stärken und die dringendsten Qualifikationslücken zu schließen.²²¹ Solche Lücken sind zum Beispiel die Umschulung von Mitarbeitenden, die in Industrien und Bereichen arbeiten, die in der Zukunft verschwinden oder ersetzt werden (z. B. rund um den Verbrennungsmotor), oder die Höherqualifizierung von Mitarbeitenden in Industrien, die entlang der Batteriewertschöpfungskette arbeiten und vor der Herausforderung stehen, die Digitalisierung (z. B. Automatisierung, autonome Systeme für F&E, Prozesse, Produktion) und ein systemisches Denken in der Wertschöpfungskette zu integrieren, z. B. um wettbewerbsfähige und nachhaltige Produkte für eine Kreislaufwirtschaft zu entwickeln, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Entscheidend für die zukünftige Beschäftigung in der Automobilwirtschaft und entlang der Batteriewertschöpfungskette ist, diesen Wandel der Beschäftigung und die daraus resultierende hohe Bedeutung beruflicher Weiterbildung zu erkennen und eine strategische Personalplanung in die Praxis umzusetzen. Die Dringlichkeit belegt das Zitat: „Derzeit kann unser Arbeitsmarkt die Nachfrage nicht ausreichend erfüllen“, sagte Maroš Šefčovič, Vizepräsident der EU-Kommission und Kommissar für Interinstitutionelle Beziehungen und Vorausschau. Entlang der gesamten Produktionskette könnten nach Industrieschätzungen im Jahr 2025 rund 800.000 qualifizierte Mitarbeiter:innen fehlen.²²²

219 RBB, 2020

220 Plattform EM, 2020

221 Batteries Europe, 2020

222 European Commission, 2021a

3 FAZIT

Batterien sind eine entscheidende Schlüsseltechnologie für eine nachhaltige Transformation von Mobilität und Energieversorgung. Gleichwohl weist die Batterietechnologie hinsichtlich der analysierten Nachhaltigkeitsthemen noch klare Optimierungspotenziale auf.

Klimaschutz: Die Batterieherstellung ist energieintensiv. Aufgrund dessen werden bei der derzeitigen Produktion batterieelektrischer Fahrzeuge mehr Treibhausgase emittiert als bei der Herstellung vergleichbarer Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Allerdings hat einerseits die stetige Weiterentwicklung der Batterietechnologie bereits zu einer Minderung der produktionsbedingten Treibhausgasemissionen geführt. Andererseits wird aus der konsequenten Nutzung erneuerbarer Energien in der Batteriezellproduktion perspektivisch ein weiterer deutlicher Emissionsrückgang resultieren. In der Nutzungsphase (well-to-wheel) zeichnen sich batterieelektrische Fahrzeuge durch geringe Treibhausgasemissionen und eine sehr hohe Energieeffizienz aus. Das gilt für den Vergleich mit Fahrzeugen sowohl mit Verbrennungsmotor als auch mit Brennstoffzellenantrieb. Daher profitiert die Batterietechnologie von der globalen Vereinbarung verbindlicher Maßnahmen zum Schutz des Klimas. Damit sollen die Schäden des Klimawandels verursachergerecht eingepreist und Anreize für nachhaltigeres Verhalten geschaffen werden. Konkret prägt sich diese Politik beispielsweise im europäischen sowie nationalen Emissionshandelssystem, in den europäischen Flottengrenzwerten oder in der antriebspezifischen Besteuerung von Kraftfahrzeugen und Treibstoffen aus.

Industriepolitik: Mit der Batteriezellfertigung wird in Europa derzeit ein neuer Industriezweig aufgebaut. Damit dieser zukunftsfähig ist, müssen vorhandene Stärken gebündelt werden. Europa und insbesondere Deutschland verfügen über erhebliche Kompetenzen im Maschinen- und Anlagenbau sowie über eine wettbewerbsfähige Forschungslandschaft in den Bereichen Fertigungstechnologie und Elektrochemie. Europäische und nationale Netzwerke wie die European Battery Alliance, ETIP BatteRIes, Batteries 2030+, LiPLANET und diverse weitere wurden ins Leben gerufen, um die Akteure des europäischen Batterie-Ökosystems miteinander zu verbinden. Auf diese Weise werden Kooperation und Wissensaustausch gestärkt. Mit öffentlichen Förderprogrammen setzt die Politik Anreize zur Entwicklung innovativer und nachhaltiger Batterietechnologien „Made in Europe“. Allein in den beiden Fördermaßnahmen Important Projects of Common European Interest (IPCEI) vergeben 12 EU-Mitgliedstaaten bis zu 6,1 Mrd. EUR Fördermittel an mehr

als 50 Unternehmen, die infolge dessen zusammen weitere 14 Mrd. EUR in den Aufbau der Batteriewertschöpfungskette investieren werden.

Kreislaufwirtschaft: Die hochlaufende Batterieproduktion erfordert zunehmend mehr Rohstoffe und die Erschließung neuer Rohstoffquellen. Um den Eingriff in die Natur möglichst gering zu halten, müssen die benötigten Batterierohstoffe effizient genutzt und in einen Ressourcenkreislauf überführt werden. Effizienzsteigernd wirken sich vor allem Second-Life-Anwendungen aus, durch die die Nutzungsdauer von Batterien und damit ihr Werterhalt deutlich gesteigert werden können. Zudem arbeiten Forschung und Industrie an der Entwicklung von Recyclingverfahren, die Altbatterien automatisiert zerlegen und bis zu 95 % der enthaltenen Rohstoffe in wiederverwendbarer Qualität zurückgewinnen. Mit dem Vorschlag zur Batterieverordnung schafft die EU die notwendigen Rahmenbedingungen für den Aufbau einer Batteriekreislaufwirtschaft. Infolge der zunehmenden Verbreitung der Elektromobilität wird der Rücklauf an Altbatterien ansteigen. Dadurch werden Skaleneffekte ermöglicht, die das umfangreiche Recycling von Batterierohstoffen auch wirtschaftlich attraktiv werden lassen.

Rohstoff-Governance: Batterierohstoffe werden gegenwärtig zum Teil in Ländern mit niedrigen Umwelt- und Sozialstandards gewonnen. Perspektivisch müssen sowohl die Rohstoffversorgung als auch die Einhaltung nachhaltiger Umwelt- und Sozialstandards in der gesamten Lieferkette gewährleistet werden. Auf der einen Seite werden neue Technologien entwickelt, mit denen die Umweltauswirkungen der Rohstoffextraktion gemindert werden können. Auf der anderen Seite werden kritische Rohstoffe durch Fortschritte in der Batterieentwicklung zunehmend substituiert. Beispielsweise konnte der Gewichtsanteil von Kobalt in modernen NMC 811 Zellen gegenüber NMC 111 Zellen bereits um 70 % reduziert werden. Darüber hinaus fordert die von der EU vorgeschlagene Batterieverordnung eine weitgehende Transparenz in der Rohstofflieferkette. Infolge dessen werden seitens der Industrie bereits Werkzeuge zur Nachverfolgung von Batterieparametern und der Einhaltung von Standards entwickelt. Ein Beispiel dafür ist der digitale Batteriepass der Global Battery Alliance.

Wirtschaftlichkeit: Werden keine staatlichen Fördermittel in Anspruch genommen, sind batterieelektrische Fahrzeuge in der Anschaffung zumeist noch teurer als vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Allerdings erreichen

batterieelektrische Fahrzeuge bereits eine Kostenparität, insbesondere dann, wenn der Vergleich auf Basis der Lebenszykluskosten angestellt wird. Künftig werden sich batterieelektrische Fahrzeuge in immer mehr Anwendungsfällen wirtschaftlich rechnen. Anders als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor weisen batterieelektrische Fahrzeuge vor allem produktionsseitig noch ein erhebliches Kostensenkungspotenzial auf. Beispielsweise werden sich die Batteriekosten bei Fortschreibung der bisherigen Lernkurve bis 2030 mehr als halbieren. Das beruht zum einen auf Skaleneffekten in der Batterieproduktion und zum anderen auf einer Steigerung der Leistungsfähigkeit von Batterien.

Beschäftigung: Durch Produktivitätsgewinne, eine Reorganisation der Wertschöpfung und eine starke Veränderung des After-Market-Geschäfts kommt es in der Automobilindustrie zu einem Rückgang traditioneller Arbeitsplätze. Mit der konsequenten Investition in Batterieproduktion und Elektromobilität kann dieser Rückgang durch eine Verschiebung der Bedarfe an Arbeitskräften größtenteils kompensiert werden. Allein entlang der Batterie-Wertschöpfungskette werden in Deutschland mehrere 10.000 neue Arbeitsplätze entstehen. Durch den Wandel der benötigten Qualifikationen entsteht ein erheblicher Qualifizierungsbedarf. Industrie, Bildungseinrichtungen und Politik müssen diese Herausforderung gemeinschaftlich adressieren und neue bedarfsgerechte Aus- und Weiterbildungsangebote schaffen.

Gelingt die Bewältigung der noch bestehenden Herausforderungen, wird mit der Batterieproduktion ein starker zukunftsfähiger Industriezweig in Deutschland und Europa geschaffen. Ihr Erfolg hängt nicht zuletzt davon ab, ob geeignete Rahmenbedingungen gefunden werden können, die sowohl alle Anforderungen an die Nachhaltigkeit als auch die Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Batterieindustrie in Einklang bringen. Erste Schritte auf diesem Weg sind bereits getan. Viele weitere werden folgen.

LITERATURVERZEICHNIS

- ACI Systems (2021).** ACI Systems ist Partner in europäischem Großprojekt European Batteries Innovation. https://www.aci-systems.de/press/ACI-Systems_PR_EuBatIn_1_DE.pdf, letzter Zugriff am 01.06.2021.
- ADAC (2021a).** VW e-Golf (04/17 - 05/20). <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/golf/vii-facelift/266575/>, letzter Zugriff am 02.06.2021.
- ADAC (2021b).** VW Golf 1.5 TSI OPF ACT Comfortline (10/18 - 11/18). <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/golf/vii-facelift/294829/>, letzter Zugriff am 02.06.2021.
- ADAC (2021c).** Stromverbrauch Elektroautos: Aktuelle Modelle im ADAC Test. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/elektromobilitaet/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/>, letzter Zugriff am 03.06.2021.
- ADAC (2021d).** VW ID.3: Das Volks-Elektroauto im ADAC Test. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/vw-id-3/>, letzter Zugriff am 28.05.2021.
- ADAC (2021e).** Kostenvergleich Elektro, Benzin oder Diesel: Lohnt es sich umzusteigen? <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/elektro-auto-kostenvergleich/>, letzter Zugriff am 28.05.2021.
- Al Barazi, S. (2018).** Rohstoffrisikobewertung – Kobalt. – DERA Rohstoffinformationen 36. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-36.pdf;jsessionid=04157C5908A8BC2953A0CBA1C611DB82.1_cid284?__blob=publicationFile&v=2, letzter Zugriff am 03.06.2021.
- Bardt, H. (2019).** Ordnungspolitik ohne industriepolitische Blindheit, in: Aiginger, K.; Bardt, H.; Belitz, H.; Bofinger, P.; Gornig, M.; Schmidt, C. M. Industriepolitik – ineffizienter staatlicher Eingriff oder zukunftsweisende Option?, in: Wirtschaftsdienst – Zeitschrift für Wirtschaftspolitik, Heft 2, 2019, S. 87-105. <https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2019/heft/2/beitrag/industriepolitik-ineffizienter-staatlicher-eingriff-oder-zukunftsweisende-option.html>, letzter Zugriff am 29.05.2021.
- BASF (2020).** Spatenstich für BASF-Anlage für Kathodenmaterialien in Schwarzheide. <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2020/11/p-20-359.html>, letzter Zugriff am 29.05.2021.
- Batteries Europe (2020).** Strategic Research Agenda for batteries 2020. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/batteries_europe_strategic_research_agenda_december_2020__1.pdf, letzter Zugriff am 02.06.2021.
- Bernhart, W.; Mogge, F. (2021).** Powertrain Market Outlook 2030. <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Powertrain-Market-Outlook-2030.html>, letzter Zugriff am 02.06.2021.
- BMU (2020).** Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik. Ausgabe 2020. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2020_broschuere_bf.pdf, letzter Zugriff am 02.06.2021.
- BMW (2020a).** Von Rohstoff bis Recycling: BMW Group entwickelt nachhaltigen Wertstoffkreislauf für Batteriezellen. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0312348DE/von-rohstoff-bis-recycling:-bmw-group-entwickelt-nachhaltigen-wertstoffkreislauf-fuer-batteriezellen?language=de>, letzter Zugriff am 01.06.2021.
- BMW (2020b).** Rohstoff-Versorgung für Batteriezellen: BMW Group kauft nachhaltiges Kobalt im Wert von rund 100 Millionen Euro in Marokko ein. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0310907DE/rohstoff-versorgung-fuer-batteriezellen:-bmw-group-kauft-nachhaltiges-kobalt-im-wert-von-rund-100-millionen-euro-in-marokko-ein-?language=de>, letzter Zugriff am 01.06.2021.
- BMW (2021).** Neue Zelltechnologie für Neue Klasse: BMW Group stärkt Batteriekompetenz als Teil der Initiative European Battery Innovation. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0330130DE/neue-zelltechnologie-fuer-neue-klasse:-bmw-group-staerkt-batteriekompetenz-als-teil-der-initiative-european-battery-innovation?language=de>, letzter Zugriff am 29.05.2021.

BMWi (2020a). Bericht über den Transformationsdialog Automobilindustrie. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/transformationsdialog-automobilindustrie-bericht.html>, letzter Zugriff am 30.05.2021.

BMWi (2020b). Die Nationale Wasserstoffstrategie. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20, letzter Zugriff am 30.05.2021.

BMWi, (2021a). Batterien „made in Germany“ – ein Beitrag zu nachhaltigem Wachstum und klimafreundlicher Mobilität. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/batterie-zellfertigung.html>, letzter Zugriff am 29.05.2021.

BMWi (2021b). Bundeskabinett verabschiedet Sorgfaltspflichtengesetz. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2021/03/20210303-bundeskabinett-verabschiedet-sorgfaltspflichtengesetz.html>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

BMWi (2021c). Automobilindustrie. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-automobilindustrie.html>, letzter Zugriff am 03.06.2021.

BMWi (2021d). Altmaier: Großer Erfolg für den Standort Deutschland und Europa! - Europäische Kommission genehmigt zweites europäisches Batterie-Projekt. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2021/01/20210126-altmaier-grosser-erfolg-fuer-standort-deutschland-und-europa-eu-kommission-genehmigt-zweites-europaeisches-batterie-projekt.html>, letzter Zugriff am 29.05.2021.

BMWi (2021e). IPCEI Wasserstoff: Gemeinsam einen Europäischen Wasserstoffmarkt schaffen. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/ipcei-wasserstoff.html>, letzter Zugriff am 30.05.2021.

BNEF (2020). Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh. <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>, letzter Zugriff am 28.05.2021.

Boddenberg, S. (2020). Lithiumabbau für E-Autos raubt Dörfern in Chile das Wasser. <https://www.dw.com/de/zunehmender-lithium-abbau-verst%C3%A4rkt-wassermangel-in-chiles-atacama-w%C3%BCste/a-52039450>, letzter Zugriff am 02.06.2021.

Bofinger, P. (2019). Paradigmenwechsel in der deutschen Wirtschaftspolitik, in: Aiginger, K.; Bardt, H.; Belitz, H.; Bofinger, P.; Gornig, M.; Schmidt, C. M. Industriepolitik – ineffizienter staatlicher Eingriff oder zukunftsweisende Option?, in: Wirtschaftsdienst – Zeitschrift für Wirtschaftspolitik, Heft 2, 2019, S. 87-105. <https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2019/heft/2/beitrag/industriepolitik-ineffizienter-staatlicher-eingriff-oder-zukunftsweisende-option.html>, letzter Zugriff am 29.05.2021.

Bollmann, O.; Neuhausen, J.; Stürmer, C.; Andre, F.; Kluschke, P. (2017). From CO₂ neutral fuels to emission-free driving. <https://www.pwc.de/de/automobilindustrie/alternative-fuels-powertrains-v2.pdf>, letzter Zugriff am 03.06.2021.

Böninghausen, D. (2019). Umicore liefert Kathodenmaterialien an LG Chem. <https://www.electrive.net/2019/09/25/umicore-lg-chem-treffen-liefervereinbarung-fuer-kathodenmaterialien/>, letzter Zugriff am 31.05.2021.

Böninghausen, D. (2021). Manz und Grob Werke vereinbaren Kooperation im Bereich Batteriesysteme. <https://www.electrive.net/2021/04/08/manz-und-grob-werke-vereinbaren-kooperation-im-bereich-batteriesysteme/>, letzter Zugriff am 31.05.2021.

Bürof, S. F. (2019). Faires Lithium aus Chile – geht das? <https://www.pv-magazine.de/2019/11/29/fares-lithium-aus-chile-geht-das/>, letzter Zugriff am 03.06.2021.

Bundesverfassungsgericht (BVerfG) (2021). Beschluss des Ersten Senats vom 24. März 2021 - 1 BvR 2656/18 -, Rn. 1-270. http://www.bverfg.de/e/rs20210324_1bvr265618.html, letzter Zugriff am 01.06.2021.

Chang, H.-J.; Andreoni, A.; Kuan, M. L. (2013). International industrial policy experiences and the lessons for the UK, Future of Manufacturing Project: Evidence Paper 4, Foresight, UK-Government Office for Science, London 2013. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/277162/ep4-international-industrial-policy-experiences.pdf, letzter Zugriff am 29.05.2021.

Colle, S.; Miller, R.; Mortier, T.; Coltelli, M.; Horstead, A.; Ruby, K.; Georgiev, K. (2021). Accelerating fleet electrification in Europe - When does reinventing the wheel make perfect sense? https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en_gl/topics/energy/ey-accelerating-fleet-electrification-in-europe-02022021-final.pdf, letzter Zugriff am 28.05.2021.

Dai, Q.; Kelly, J. C.; Gaines, L.; Wang, M. (2019). Life cycle analysis of lithium-ion batteries for automotive applications. *Batteries*, 5(2), 48. <https://www.mdpi.com/2313-0105/5/2/48/pdf>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Daimler (2021). Unsere Aktivitäten in der Kobalt-Lieferkette. <https://www.daimler.com/nachhaltigkeit/menschenrechte/lieferkette/kobalt.html>, letzter Zugriff am 03.06.2021.

Damm, S.; Zhou, Q.; (2020). Supply and demand of natural graphite - DERA Rohstoffinformationen 43. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie%20Graphite%20eng%202020.pdf?__blob=publicationFile&v=3, letzter Zugriff am 03.06.2021.

DERA (2021). Batterierohstoffe für die Elektromobilität – DERA Themenheft. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-21.pdf;jsessionid=8F15C5DD0041DBCF122D275BF10A34EB.2_cid284?__blob=publicationFile&v=6, letzter Zugriff am 01.06.2021.

Deutsche Lithium (2021). Zinnwald-Lithium-Projekt. www.deuschelithium.de/projekte/zinnwald-lithium-projekt, letzter Zugriff am 03.06.2021.

Deutscher Bundestag (2021a). Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Bundesberggesetzes und zur Änderung der Verwaltungsgerichtsordnung. <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/284/1928402.pdf>, letzter Zugriff am 05.06.2021.

Deutscher Bundestag (2021b). Drucksache 19/30505. Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Arbeit und Soziales (11. Ausschuss) a) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung – Drucksachen 19/28649, 19/29592 – Entwurf eines Gesetzes über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten in Lieferketten - b) zu dem Antrag der Abgeordneten Michel Brandt, Eva-Maria Schreiber, Heike Hänsel, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE

LINKE. – Drucksache 19/29279 – Sorgfaltspflichtengesetz grundlegend nachbessern – Menschenrechte in Lieferketten wirksam schützen. <https://dserver.bundestag.de/btd/19/305/1930505.pdf>, letzter Zugriff am 11.06.2021.

Die Bundesregierung (2019). CO₂-Bepreisung. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/co2-bepreisung-1673008>, letzter Zugriff am 03.06.2021.

Die Bundesregierung (2021a). Klimaschutzgesetz 2021. Generationenvertrag für das Klima. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>, letzter Zugriff am 03.06.2021.

Die Bundesregierung (2021b). Verkehr. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/verkehr-1672896>, letzter Zugriff am 03.06.2021.

Dolega, P.; Buchert, M.; Betz, J. (2020). Ökologische und sozio-ökonomische Herausforderungen in Batterie Lieferketten: Graphit und Lithium. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Graphit-Lithium-Oeko-Soz-Herausforderungen.pdf>, letzter Zugriff am 04.06.2021.

Drobe, M. (2020). Lithium - Informationen zur Nachhaltigkeit. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/lithium.pdf;jsessionid=C7B90BA0123B1F074B3EB19771301B90.1_cid321?__blob=publicationFile&v=4, letzter Zugriff am 04.06.2021.

Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) (2021). § 1 Zweck und Ziel des Gesetzes. https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/__1.html, letzter Zugriff am 04.06.2021.

ElektroMobilität NRW (2020). Wie funktioniert die Batterie? <https://www.elektromobilitaet.nrw/infos/batterie/#:~:text=Kosten%20der%20Batterie,rund%20100%20%E2%82%AC%20pro%20Kilowattstunde>, letzter Zugriff am 28.05.2021.

Emilsson, E. und Dahllöf, L. (2019). Lithium-Ion Vehicle Battery Production – Status 2019 on Energy Use, CO₂ Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling. <https://www.ivl.se/download/18.14d7b12e16e3c5c36271070/1574923989017/C444.pdf>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Europäische Kommission (2018). Annex. Europe on the move - Sustainable Mobility for Europe: safe, connected and clean. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:0e8b694e-59b5-11e8-ab41-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_3&format=PDF, letzter Zugriff am 31.05.2021.

Europäische Kommission (2019a). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Der europäische Grüne Deal. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF, letzter Zugriff am 03.06.2021.

Europäische Kommission (2019b). Anhang der Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Der europäische Grüne Deal. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1596443911913&uri=CELEX:52019D0640#document2>, letzter Zugriff am 31.05.2021.

Europäische Kommission (2019c). Kommission genehmigt Milliardenförderung durch sieben EU-Staaten für paneuropäische Innovationen bei Batterien. https://ec.europa.eu/germany/news/20191209batterien_de, letzter Zugriff am 29.05.2021.

Europäische Kommission (2020a). Grüner Deal: Nachhaltige Batterien für eine kreislauforientierte und klimaneutrale Wirtschaft. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/de/ip_20_2312/IP_20_2312_DE.pdf, letzter Zugriff am 31.05.2021.

Europäische Kommission (2020b). Nachhaltigkeit von Batterien über ihren gesamten Lebenszyklus - Ein Schritt in Richtung Kreislaufwirtschaft und Klimaneutralität. <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/867247/Nachhaltigkeit%20von%20Batterien%20%3%BCber%20ihren%20gesamten%20Lebenszyklus.pdf>, letzter Zugriff am 31.05.2021.

Europäische Kommission (2020c). Fragen und Antworten zur Verordnung über nachhaltige Batterien. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/de/qanda_20_2311/QANDA_20_2311_DE.pdf, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Europäische Kommission (2020d). Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und Rates über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:4b5d88a6-3ad8-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0019.02/DOC_1&format=PDF, letzter Zugriff am 03.06.2021.

Europäische Kommission (2020e). Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=COM:2020:98:FIN>, letzter Zugriff am 03.06.2021.

Europäische Kommission (2020f). Fragen und Antworten: Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/de/qanda_20_1257/QANDA_20_1257_DE.pdf, letzter Zugriff am 30.05.2021.

Europäische Kommission (2020g). Mitteilung der Europäischen Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>, letzter Zugriff am 14.06.2021.

European Commission (2021a). Statement by Vice-President Šefčovič on the second IPCEI on batteries in the context of the European Battery Alliance. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/SPEECH_21_228, letzter Zugriff am 03.06.2021.

Europäische Kommission (2021b). Staatliche Beihilfen: Kommission genehmigt öffentliche Förderung von 2,9 Mrd. EUR für ein zweites, die gesamte Batterie-Wertschöpfungskette betreffendes paneuropäisches Forschungs- und Innovationsvorhaben von zwölf Mitgliedstaaten. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_21_226, letzter Zugriff am 29.05.2021.

EUROBAT (2020). White Paper - Battery Innovation Roadmap 2030. https://www.eurobat.org/images/EUROBAT_Battery_Innovation_Roadmap_2030_White_Paper.pdf, letzter Zugriff am 04.06.2021.

EUROBAT (2021). Position paper on the Proposal for a Regulation 2020/353 concerning batteries and waste batteries. EUROBAT. <https://www.eurobat.org/news-publications/position-papers/484-position-paper-on-the-proposal-for-a-regulation-2020-353-concerning-batteries-and-waste-batteries>, letzter Zugriff am 31.05.2021.

European Environment Agency (2020a). Greenhouse gas emissions from transport in Europe. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases-7/assessment>, letzter Zugriff am 01.06.2021.

European Environment Agency (2020b). Greenhouse gas emissions from transport in the EU, December 2020. https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/greenhouse-gas-emissions-from-transport#tab-chart_1, letzter Zugriff am 04.06.2021.

Eurostat (2021). Energie – Energiestatistik. <https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/energy/data/database>, letzter Zugriff am 04.06.2021.

Facing Finance (2017). Gold- und Kupfermine Mount Polley erhält nach Dammbbruch Genehmigung, behandeltes Abwasser in den Quesnel Lake zu leiten. <https://www.facing-finance.org/de/2017/05/gold-und-kupfermine-mount-polley-erhalt-nach-dammbbruch-genehmigung-behandeltes-abwasser-in-den-quesnel-lake-zu-leiten/>, letzter Zugriff am 02.06.2021.

Falck, O.; Czernich, C.; Koenen, J. (2021). Auswirkungen der vermehrten Produktion elektrisch betriebener Pkw auf die Beschäftigung in Deutschland. https://www.vda.de/dam/vda/publications/2021/Politik-und-Gesellschaft/ifo-Studie-2021_Elektromobilitaet-Beschaeftigung.pdf, letzter Zugriff am 05.06.2021.

Field, K. (2020). Bloomberg NEF: Lithium-Ion Battery Cell Densities Have Almost Tripled Since 2010. <https://cleantechica.com/2020/02/19/bloombergnef-lithium-ion-battery-cell-densities-have-almost-tripled-since-2010/>, letzter Zugriff am 05.06.2021.

Frankel, T. C.; Whoriskey, P. (2016). Tossed aside in the “White Gold” rush. <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/tossed-aside-in-the-lithium-rush/?tid=batteriesseriesbox>, letzter Zugriff am 05.06.2021.

Frankel, T. C. (2016). The Cobalt pipeline. <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/congo-cobalt-mining-for-lithium-ion-battery/?tid=batteriesseriesbox>, letzter Zugriff am 05.06.2021.

Fraunhofer ICT (2021). Großprojekt „RedoxWind“. <https://www.ict.fraunhofer.de/de/komp/ae/RFBWind.html>, letzter Zugriff am 05.06.2021.

Fraunhofer IPA (2021). Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren DeMoBat. <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/DeMoBat.html>, letzter Zugriff am 05.06.2021.

Fraunhofer IWKS (2020). Fraunhofer IWKS baut Zentrum für Demontage und Recycling für Elektromobilität in Hanau auf. <https://www.iwks.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/pressemeldungen-2020/start-zdr-emil.html>, letzter Zugriff am 05.06.2021.

Fraunhofer IKTS (2021). cerenergy® – Die Hochtemperaturbatterie für die stationäre Energiespeicherung. https://www.ikts.fraunhofer.de/de/departments/energy_bio-medical_technology/system_intgeration_technology_transfer/stationary_energy_storage/cerenergy.html, letzter Zugriff am 05.06.2021.

Frese, A (2021). Milliarden für neue Batterien. <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/elektromobilitaet-im-fokus-der-politik-milliarden-fuer-neue-batterien/26854386.html>, letzter Zugriff am 29.05.2021.

future:fuels (2020). EU-Wasserstoffstrategie: Bis 2030 soll Wasserstoff ein wesentlicher Bestandteil des Energiesystems werden. <https://futurefuels.blog/in-der-theorie/eu-wasserstoffstrategie-fuer-eine-gruene-wasserstoffinfrastruktur/>, letzter Zugriff 30.05.2021.

Gieschen, J.-H.; Bünting, A.; Kruse, S.; Vorholt, F.; Wolf, S.; Zachäus, S. (2021) Ökosystem der Batteriezellfertigung in Europa - Netzwerkstrukturen als Grundlage für Wissenstransfer und Wertschöpfungspartnerschaften. https://vdiv.de-it.de/sites/default/files/document/%C3%96kosystem_Batteriezellfertigung_Europa.pdf, letzter Zugriff am 07.06.2021.

- Götz, O. (2019).** Bodenschätze 4.0 – Wie viel Potenzial steckt in den Rohstoffen von Morgen? <https://www.boerse-am-sonntag.de/rohstoffe/rohstoffanalysen/artikel/so-viel-potenzial-steckt-in-lithium-kobalt-nickel.html>, letzter Zugriff am 05.06.2021.
- Götz, S. (2021).** Wie E-Autos den Durchbruch geschafft haben. <https://www.zeit.de/mobilitaet/2021-04/elektroautos-elektromobilitaet-ladesaeulen-infrastruktur-entwicklung-zuwachs>, letzter Zugriff am 29.05.2021.
- Götze, S. (2019).** Lithium-Abbau in Südamerika - Kehrseite der Energiewende. https://www.deutschlandfunk.de/lithium-abbau-in-suedamerika-kehrseite-der-energiewende.724.de.html?dram:article_id=447604, letzter Zugriff am 05.06.2021.
- Greis, W. (2021).** Akkuproduktion: Bolivien schreibt Pilotprojekte zur Lithiumgewinnung neu aus. <https://www.golem.de/news/akkuproduktion-bolivien-schreibt-pilotprojekte-zur-lithiumgewinnung-neu-aus-2105-156187.html>, letzter Zugriff am 08.06.2021.
- Günnel, T. (2020).** BMW baut Pilotwerk für Batteriezellen. <https://www.automobil-industrie.vogel.de/bmw-baut-pilotwerk-fuer-batteriezellen-a-952869/>, letzter Zugriff am 30.05.2021.
- Haas, T.; Jürgens, I. (2019).** VW begrünt? Der Kampf ums Auto, in: Blätter für deutsche und internationale Politik, Nr. 9/2019. <https://www.blaetter.de/ausgabe/2019/september/vw-begrueent-der-kampf-ums-auto>, letzter Zugriff am 30.05.2021.
- Haas, T. (2020).** Die Mobilitätswende als Auslöser einer tief greifenden Transformation des „Modell Deutschland“? <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11615-020-00273-z.pdf>, letzter Zugriff am 30.05.2021.
- Hagedorn, M.; Hartmann, S.; Olschewski, I. (2019).** Automobile Wertschöpfung 2030/2050. https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=16, letzter Zugriff am 01.06.2021.
- Harrison, D. (2021).** Electric Vehicle Battery Supply Chain Analysis. How Battery Demand and Production Are Reshaping the Automotive Industry - March 2021. https://new.abb.com/docs/librariesprovider89/default-document-library/automotive-battery-supply-chain-analysis-2021-final_abb_ams---abridged-version-docx.pdf?sfvrsn=3bc9f708_2, letzter Zugriff am 31.5.2021.
- Harper, G.; Sommerville, R.; Kendrick, E.; Driscoll, L.; Slater, P.; Stolkin, R.; Walton, A.; Christensen, P.; Heidrich, O.; Lambert, S.; Abbott, A.; Ryder, K.; Gaines, L.; Anderson, P. (2019).** Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75-86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>, letzter Zugriff am 05.06.2021.
- Herrmann, F.; Beinhauer, W.; Borrmann, D.; Hertwig, M.; Mack, J.; Potinecke, T.; Praeg, C.-P.; Rally, P. (2020).** Beschäftigung 2030 – Auswirkungen von Elektromobilität und Digitalisierung auf die Qualität und Quantität der Beschäftigung bei Volkswagen. http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-6154803.pdf, letzter Zugriff am 05.06.2021.
- Hiltscher, B. (2021).** Nachhaltiger Lithium-Abbau: BMW schließt Vertrag mit Livent. <https://www.bimmertoday.de/2021/03/30/nachhaltiger-lithium-abbau-bmw-schliesst-vertrag-mit-livent/>, letzter Zugriff am 05.06.2021.
- Hofstätter, T.; Krawina, M.; Mühlreiter, B.; Pöhler, S.; Tschiesner, A. (2020).** Reimagining the auto industry's future: It's now or never. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/reimagining-the-auto-industrys-future-its-now-or-never>, letzter Zugriff am 05.06.2021.
- IEA (2021).** Global EV Outlook 2021. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>, letzter Zugriff am 02.06.2021.
- International Lithium Corp. (ILC) (2018).** International Lithium Reports Drilling Commences at the Avalonia Lithium JV, Ireland. <https://internationallithium.com/international-lithium-reports-drilling-commences-at-the-avalonia-lithium-jv-ireland/>, letzter Zugriff am 05.06.2021.
- Ingenieur.de (2019).** Fokus Ökologie: Tesla plant eigenes Batterierecycling. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/e-mobilitaet/fokus-oekologie-tesla-plant-eigenes-batterie-recycling/> letzter Zugriff am 06.06.2021.

Initiative Lieferkettengesetz.de (2020). "Ergebnis ist ein Offenbarungseid": Stellungnahme der Initiative Lieferkettengesetz zur Menschenrechts-Befragung deutscher Unternehmen. <https://lieferkettengesetz.de/pressemitteilung/stellungnahme-zur-menschenrechts-befragung-deutscher-unternehmen/>, letzter Zugriff am 06.06.2021.

Johannsen, F. (2020). Für 100 Millionen Euro: BMW kauft Kobalt in Marokko - Ersatz für Bezug aus dem Kongo. <https://www.automobilwoche.de/article/20200709/NACHRICHTEN/200709894/fuer--millionen-euro-bmw-kauft-kobalt-in-marokko---ersatz-fuer-bezug-aus-dem-kongo>, letzter Zugriff am 06.06.2021.

Jungheinrich AG (2019). Strategische Investition in Lithium-Ionen-Technologie. Jungheinrich AG. <https://www.jungheinrich.com/presse-events/strategische-investition-in-lithium-ionen-technologie-584886>, letzter Zugriff am 06.06.2021.

KION Group (2020). KION Battery Systems startet die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien. KION Group. https://www.kiongroup.com/de/News-Stories/Stories/Energy/Story-Detail_34240.html, letzter Zugriff am 06.06.2021.

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2020). Nachhaltigkeit im Blick: Lithium aus dem Oberrheingraben für Batterien. https://www.kit.edu/kit/pi_2020_118_nachhaltigkeit-im-blick-lithium-aus-dem-oberrheingraben-fur-batterien.php, letzter Zugriff am 28.05.2021.

Knobloch, F.; Hanssen, S. V.; Lam, A.; Pollitt, H.; Salas, P.; Chewpreecha, U.; Huijbregts, M. A. J.; Mercure, J.-F. (2020). Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time. *Nature Sustainability* VOL 3, June 2020. S. 437–447. <https://www.nature.com/articles/s41893-020-0488-7.pdf>, letzter Zugriff am 07.06.2021.

Koch, T; Toedter, O.; Weber, P. (2020): VDI-Studie: Ökobilanz von Pkws mit verschiedenen Antriebssystemen. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.) <https://www.feri-institut.de/media/uzpjs0uc/0245-publikation-fvt-oekobilanz-von-pkws-mit-verschiedenen-antriebssystemen-vdi-studie-oktober-2020-7.pdf?cHash=da657be7aed28b0ac98bbb2ab13fbe99>, letzter Zugriff am 07.06.2021.

Köllner, C. (2019). Warum Deutschland bei der Batteriezellfertigung aufholen muss. <https://www.springerprofessional.de/batterie/elektromobilitaet/warum-deutschland-bei-der-batteriezellfertigung-aufholen-muss/16386806>, letzter Zugriff am 28.05.2021.

Köllner, C. (2021). Faktencheck Elektroauto-Batterien. <https://www.springerprofessional.de/batterie/elektrofahrzeuge/faktencheck-elektroauto-batterien/17624376>, letzter Zugriff am 28.05.2021.

Kunde, D. (2019). Batterierecycling: Viel zu wertvoll zum Wegwerfen. <https://www.golem.de/news/batterierecycling-viel-zu-wertvoll-zum-wegwerfen-1905-140943.html>, letzter Zugriff am 07.06.2021.

Küpper et al. (2020). Shifting Gears in Auto Manufacturing. <https://www.bcg.com/publications/2020/transformative-impact-of-electric-vehicles-on-auto-manufacturing>, letzter Zugriff am 15.04.2021.

Lutsey, N.; Nicholas, M. (2019). Update on electric vehicle costs in the United States through 2030. icct Working Paper 2019-06. https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV_cost_2020_2030_20190401.pdf, letzter Zugriff am 28.05.2021.

Manager Magazin (2021). Pkw-Absatz: Automarkt in China legt im März 2021 um 66 Prozent zu. <https://www.managermagazin.de/unternehmen/autoindustrie/pkw-absatz-automarkt-in-china-legt-im-maerz-2021-um-66-prozent-zu-a-5d1d95e9-1847-47d1-b31e-5bed66b71ed5>, letzter Zugriff am 15.04.2021.

Mönnig, Anke; Schneemann, Christian; Weber, Enzo; Zika, Gerd; Helmrich, Robert (2018). Elektromobilität 2035 - Effekte auf Wirtschaft und Erwerbstätigkeit durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Personenkraftwagen. (IAB-Forschungsbericht, 08/2018). <http://doku.iab.de/forschungsbericht/2018/fb0818.pdf>, letzter Zugriff am 07.06.2021.

Mortsieffer, H. (2019). Provokation von VW. Autoverband in Aufruhr. <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/provokation-von-vw-autoverband-in-aufruhr/24121642.html>, letzter Zugriff am 01.06.2021.

Niese, N.; Pieper, C.; Arora, A.; Xie, A. (2020). The Case for a Circular Economy in Electric Vehicle Batteries. Boston Consulting Group. <https://www.bcg.com/publications/2020/case-for-circular-economy-in-electric-vehicle-batteries>, letzter Zugriff am 01.06.2021.

Neue Mobilität (NM) (2021). Deutsche Batteriezellproduktion – das nächste Milliardengrab? <https://neuemobilitaet.org/batteriezellenproduktion/>, letzter Zugriff am 30.05.2021.

Nobis, C.; Kuhnimhof, T. (2018). Mobilität in Deutschland - MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15). Bonn, Berlin. http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf, letzter Zugriff am 29.05.2021.

NPE - Nationale Plattform Elektromobilität (2016). Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland. <https://www.acatech.de/publikation/roadmap-integrierte-zell-und-batterieproduktion-deutschland/download-pdf/?lang=de>, letzter Zugriff am 23.04.2021.

NPM – Nationale Plattform Zukunft der Mobilität AG4 (2020). 1. Zwischenbericht zur strategischen Personalplanung und -entwicklung im Mobilitätssektor. <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/2download/1-zwischenbericht-zur-strategischen-personalplanung-und-entwicklung-im-mobilitaetssektor/>, letzter Zugriff am 23.04.2021.

NPM - Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2019). Wege zur Erreichung der Klimaziele. <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/03/NPM-AG-1-Wege-zur-Erreichung-der-Klimaziele-2030-im-Verkehrssektor.pdf>, letzter Zugriff am 23.04.2021.

NPM - Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2020). Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität. https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/01/NPM_Fortschrittsbericht2020_final.pdf, letzter Zugriff am 23.4.2021.

OECD (2018). OECD-Leitfaden für die Erfüllung der Sorgfaltspflicht für verantwortungsvolles unternehmerisches Handeln. <http://mneguidelines.oecd.org/OECD-leitfaden->

[fur-die-erfullung-der-sorgfaltspflicht-fur-verantwortungsvolles-unternehmerisches-handeln.pdf](http://mneguidelines.oecd.org/OECD-leitfaden-fur-die-erfullung-der-sorgfaltspflicht-fur-verantwortungsvolles-unternehmerisches-handeln.pdf), letzter Zugriff am 23.04.2021.

OECD (2019). OECD-Leitfaden für die Erfüllung der Sorgfaltspflicht zur Förderung verantwortungsvoller Lieferketten für Minerale aus Konflikt- und Hochrisikogebieten: Dritte Ausgabe, OECD Publishing, Paris.: <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/3d21faa0-de.pdf>, letzter Zugriff am 23.04.2021.

P3 (2020). Tesla Battery Day 2020 – Technology Announcement Analysis. https://www.electrive.net/wp-content/uploads/2020/09/200923_Tesla_Battery-Day_P3-Assessment-published.pdf, letzter Zugriff am 29.05.2021.

Plattform EM (2020). European Platform for electromobility's position on Green Deal (2020): European Green Deal and Green Recovery: time to focus on Electromobility. <https://www.platformelectromobility.eu/2020/06/03/european-green-deal-and-green-recovery-time-to-focus-on-electromobility/>, letzter Zugriff am 23.04.2021.

Plötz, P.; Wachsmuth, J.; Gnann, T.; Neuner, F.; Speth, D. (2021). Net-zero-carbon transport in Europe until 2050 – Targets, technologies and policies for a long-term EU strategy. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/EU_Transport_policybrief_long.pdf, letzter Zugriff am 01.06.2021.

Polestar (2021). Sustainability report 2020. <https://reports.polestar.com/media/v0qp2bte/polestar-sustainability-report-2020.pdf>, letzter Zugriff am 01.06.2021.

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021). Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. https://static.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf, letzter Zugriff am 01.06.2021.

RAM (2020). Global Li-ion Battery Anode Material Market to 2026: Focus on China. <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2020/09/02/2087499/28124/en/Global-Li-ion-Battery-Anode-Material-Market-to-2026-Focus-on-China.html>, letzter Zugriff am 07.05.2021.

Randall, C. (2021). Blockchain solution to tracking ethically sourced cobalt. <https://www.electrive.com/2021/05/20/blockchain-solution-to-tracking-ethically-sourced-cobalt/>, letzter Zugriff am 07.05.2021.

RBB (2020). Aufbau einer Kathodenfabrik: BASF Schwarzheide bekommt 175 Millionen Euro Fördergelder. <https://www.rbb24.de/studiocottbus/politik/2020/08/basf-schwarzheide-foerdermittel-kathodenfertigung.html>, letzter Zugriff am 07.05.2021.

Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 setting CO₂ emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0631>, letzter Zugriff am 07.06.2021.

RioTinto (2021). Projects. <https://www.riotinto.com/operations/projects>, letzter Zugriff am 07.06.2021.

Roland Berger (2018). Lithium-ion battery value chain shares. <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Battery-recycling-is-a-key-market-of-the-future-Is-it-also-an-opportunity-for.html>, letzter Zugriff am 07.05.2021.

Roman, L. (2021). The 'Battery Passport' and the future of the auto industry. <https://www.everledger.io/the-battery-passport-and-the-future-of-the-auto-industry/>, letzter Zugriff am 07.06.2021.

Rongke (2012). Projekt für Windpark-Energiespeicherung. <http://www.rongkepower.com/Product/show/catid/181/id/184/lang/de.html>, letzter Zugriff am 01.06.2021.

Rudolph, F., & Jochem, P. (2021). Die Rolle von Elektroautos in der Mobilität von morgen. Ambitionierte Flottenemissionsnormen und flankierende Politikinstrumente helfen, deutsche Klimaschutzziele zu erreichen (Zukunftsimpuls Nr. 15). Wuppertal Institut. <https://epub.wupperinst.org/front->

door/deliver/index/docId/7663/file/ZI15_Elektroautos.pdf, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Sachverständigenrat (2019). Den Strukturwandel meistern - Jahresgutachten 2019. https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/gutachten/jg201920/JG201920_Gesamtausgabe.pdf, letzter Zugriff am 29.05.2021.

Sachverständigenrat (2020). Corona-Krise gemeinsam bewältigen, Resilienz und Wachstum stärken. Jahresgutachten 2021. https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/gutachten/jg202021/JG202021_Gesamtausgabe.pdf, letzter Zugriff am 29.05.2021.

Schaal, S. (2020a). PSA-Batteriezell-JV ACC offiziell gegründet. <https://www.electrive.net/2020/09/04/psa-batteriezell-jv-acc-offiziell-gegruendet/>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Schaal, S. (2020b). BMW schließt „langfristigen“ Liefervertrag mit Northvolt. <https://www.electrive.net/2020/07/16/bmw-schliesst-langfristigen-liefervertrag-mit-northvolt/>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Schaal, S. (2020c) Northvolt liefert Batterien an E-Motorradbauer Cake. <https://www.electrive.net/2020/11/25/northvolt-liefert-batterien-an-e-motorradbauer-cake/>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Schaal, S. (2020d) Northvolt liefert Großauftrag an Epiroc aus. <https://www.electrive.net/2020/03/18/northvolt-liefert-grossauftrag-an-epiroc-aus/>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Schaal, S. (2020e) LG Chem schließt Abspaltung von Batteriesparte ab. <https://www.electrive.net/2020/12/02/lg-chem-schliesst-bspaltung-von-batteriesparte-ab/>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Schaal, S. (2020f). Battery Day: Tesla zeigt neue 4680-Batterie zelle. <https://www.electrive.net/2020/09/23/battery-day-tesla-zeigt-neue-4680-batterie-zelle/>, letzter Zugriff am 29.05.2021.

Schaal, S. (2020g). Lucid Air startet zu Preisen ab 80.000 Dollar. <https://www.electrive.net/2020/09/10/lucid-air-startet-zu-preisen-ab-80-000-dollar/>, letzter Zugriff am 29.05.2021.

- Schaal, S. (2021a).** Mercedes EQS: Aerodynamischer Luxus-Stromer mit 770 Kilometern Reichweite. <https://www.electrive.net/2021/04/15/mercedes-eqs-aerodynamischer-luxus-stromer-mit-770-kilometern-reichweite/>, letzter Zugriff am 29.05.2021.
- Schaal, S. (2021b).** IPCEI-Förderung für zwölf H2-Mobilitäts-Projekte. <https://www.electrive.net/2021/05/28/ipcei-foerderung-fuer-zwoelf-h2-mobilitaets-projekte/>, letzter Zugriff am 01.06.2021.
- Schmidt, C. M. (2019).** Gute Industriepolitik setzt auf Wettbewerb und Innovation, in: Aiginger, K.; Bardt, H.; Belitz, H.; Bofinger, P.; Gornig, M.; Schmidt, C. M. Industriepolitik – ineffizienter staatlicher Eingriff oder zukunftsweisende Option?, in: Wirtschaftsdienst – Zeitschrift für Wirtschaftspolitik, Heft 2, 2019, S. 87-105. <https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2019/heft/2/beitrag/industriepolitik-ineffizienter-staatlicher-eingriff-oder-zukunftsweisende-option.html>, letzter Zugriff am 29.05.2021.
- Schneider, J. (2021).** Vulcan Energy Pilotanlage im Oberrheingraben in Betrieb gegangen. <https://www.tiefengeothermie.de/news/vulcan-energy-pilotanlage-im-oberrheingraben-betrieb-gegangen>, letzter Zugriff am 04.06.2021.
- Scholz, C. (2021).** Das E-Auto-Problem: tausende Tonnen Batterien landen vorzeitig im Müll. <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/elektromobilitaet-das-e-auto-problem-tausende-tonnen-batterien-landen-vorzeitig-im-muell/27086770.html?ticket=ST-11561242-JbbkqROZd4JbTZPVyffJ-ap3>, letzter Zugriff am 07.06.2021.
- Schütte, P. (2021).** Kobalt – Informationen zur Nachhaltigkeit, DERA Rohstoffinformationen. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/kobalt.pdf;jsessionid=0FBD844D94461D408EE318742F03B3CF.2_cid284?__blob=publicationFile&v=4, letzter Zugriff am 09.06.2021.
- Seiwert, M. (2019).** VWs Batterien enthalten viermal so viel Kobalt wie Tesla-Batterien. <https://www.wiwo.de/unternehmen/auto/volkswagen-elektroautos-vws-batterien-enthalten-viermal-so-viel-kobalt-wie-tesla-batterien/24156880.html>, letzter Zugriff am 07.06.2021.
- Seyerlein, C. & Prawitz, S. (2020).** VW plant Batterie ohne Kobalt. <https://www.automobil-industrie.vogel.de/vw-plant-batterie-ohne-kobalt-a-972382/>, letzter Zugriff am 07.06.2021.
- Shang, K. (2021).** Lithium-ion batteries: LFP cathode materials market share forecast to increase in 2021. <https://roskill.com/news/lithium-ion-batteries-lfp-cathode-materials-market-share-forecast-to-increase-in-2021/>, letzter Zugriff am 07.06.2021.
- Slowik, P., Lutsey, N., & Hsu, C. W. (2020).** How Technology, Recycling, And Policy Can Mitigate Supply Risks To The Long-Term Transition To Zero-Emission Vehicles. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/sites/default/files/publications/zev-supply-risks-dec2020.pdf>, letzter Zugriff am 31.05.2021.
- Solarserver (2013).** Japan installiert zwei große Batteriespeicher zur Netzintegration von Solar- und Windstrom. <https://www.solarserver.de/2013/08/09/japan-installiert-zwei-grosse-batteriespeicher-zur-netzintegration-von-solar-und-windstrom/>, letzter Zugriff am 04.06.2021.
- Spiegel (2020).** Leck in Wärmekraftwerk - 20.000 Tonnen Diesel ausgelaufen. <https://www.spiegel.de/panorama/russland-leck-in-waermekraftwerk-20-000-tonnen-diesel-ausgelaufen-a-37dea1c6-42d5-40c0-a743-37c56d97c2c8>, letzter Zugriff am 07.06.2021.
- Statista (2021).** Weltweite Automobilproduktion 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/151749/umfrage/entwicklung-der-weltweiten-automobilproduktion/>, letzter Zugriff am 08.06.2021.
- Steen, M.; Lebedeva, N.; Di Persio, F.; Boon-Brett, L. (2017).** EU Competitiveness in Advanced Li-ion Batteries for E-Mobility and Stationary Storage Applications – Opportunities and Actions. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC108043>, letzter Zugriff am 06.06.2021.
- Sternberg, A.; Hebling, C. M.; Hank, C. (2019).** Greenhouse gas emissions for Battery electric and fuel cell electric vehicles with ranges over 300 km. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/News/190815_LCA-BEV-FCEV_Results_EnglishVersion.pdf, letzter Zugriff am 07.06.2021.

Sommerville, R., Zhu, P., Rajaeifar, M. A., Heidrich, O., Goodship, V., & Kendrick, E. (2021). A qualitative assessment of lithium ion battery recycling processes. 165. 105219. Resources, Conservation and Recycling. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920305358>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Terrafame (2020). Terrafame's nickel sulphate production offers 60% lower carbon footprint than existing conventional processes. <https://www.terrafame.com/news-from-the-mine/news/2020/09/terrafames-nickel-sulphate-production-offers-the-lowest-carbon-footprint-in-the-industry-altogether-60-lower-than-in-existing-conventional-processes.html>, letzter Zugriff am 01.06.2021.

Tesla (2020). Tesla Conflict Minerals Report. <https://www.tesla.com/sites/default/files/about/legal/2019-conflict-minerals-report.pdf>, letzter Zugriff am 01.06.2021.

The Mobility House (2020). https://www.mobilityhouse.com/de_de/ratgeber/tco-vergleich-elektroauto-vs-benziner, letzter Zugriff am 28.05.2021.

Thielmann, A.; Neef, C.; Hettesheimer, T.; Döscher, H.; Wietschel, M.; Tübke, J. (2017). Energiespeicher-Roadmap (Update 2017): Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien. <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Roadmap-Dezember-2017.pdf>, letzter Zugriff am 15.04.2021.

Thielmann, A.; Neef, C.; Fenske, C.; Wietschel, M. (2018). Energiespeicher-Monitoring 2018: Leitmarkt- und Leitanbieterstudie: Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Monitoring_2018.pdf, letzter Zugriff am 28.05.2021.

Thielmann, A.; Wietschel, M.; Funke, S.; Grimm, A.; Hettesheimer, T.; Langkau, S.; Loibl, A.; Moll, C.; Neef, C.; Plötz, P.; Sievers, L.; Tercero Espinoza, L.; Edler, J. (2020). Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf. <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>, (dort Endnoten 92, 112, 119), letzter Zugriff am 02.06.2021.

Thielmann, A.; Neef, C.; Hettesheimer, T.; Ahlbrecht, K.; Ebert, S. (2021). Future Expert Needs in the Battery Sector.

<https://eitrawmaterials.eu/wp-content/uploads/2021/03/EIT-RawMaterials-Fraunhofer-Report-Battery-Expert-Needs-March-2021.pdf>, letzter Zugriff am 18.05.2021.

Transport & Environment (2017). Electric vehicle life cycle analysis and raw material availability. https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2017_10_EV_LCA_briefing_final.pdf, letzter Zugriff am 18.05.2021.

Transport & Environment (2020a). Mission (almost) accomplished. https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020_10_TE_Car_CO2_report_final.pdf, letzter Zugriff am 01.06.2021.

Transport & Environment (2020b). How clean are electric cars? T&E's analysis of electric car lifecycle CO₂ emissions. <https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/downloads/T%26%E2%80%99s%20EV%20life%20cycle%20analysis%20LCA.pdf>, letzter Zugriff am 18.05.2021.

Transport & Environment (2021a). CO₂ targets propel Europe to 1st place in emobility race. <https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/2020%20EV%20sales%20briefing.pdf>, letzter Zugriff am 18.05.2021.

Transport & Environment (2021b). Cars CO₂ review: Europe's chance to win the emobility race. <https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Car%20CO2%202021%20revision%20-%20position%20paper%20%28T%26E%29.pdf>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Umweltbundesamt (2020). Emissionen des Verkehrs. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#pkw-fahren-heute-klima-und-umweltvertraglich>, letzter Zugriff am 18.05.2021.

Umweltbundesamt (2021a). Emissionsdaten. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#HBEFA>, letzter Zugriff am 18.05.2021.

Umweltbundesamt (2021b). Treibhausgas-Emissionen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>, letzter Zugriff am 18.05.2021.

UN Environment Programme (UNEP) (2009). Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. <https://www.oeko.de/oekodoc/908/2009-023-en.pdf>, letzter Zugriff am 07.06.2021.

UN Global Compact (2021). The Ten Principles of the UN Global Compact. <https://www.unglobalcompact.org/what-is-gc/mission/principles>, letzter Zugriff am 07.06.2021.

U.S. Geological Survey (USGS) (2021a). Mineral Commodity Summaries, January 2021. Cobalt. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-cobalt.pdf>, letzter Zugriff am 07.06.2021.

U.S. Geological Survey (USGS) (2021b). Mineral Commodity Summaries, January 2021. Lithium. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-lithium.pdf>, letzter Zugriff am 07.06.2021.

U.S. Geological Survey (USGS) (2021c). Mineral Commodity Summaries, January 2021. Graphit. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-graphite.pdf>, letzter Zugriff am 09.06.2021.

Vanadium (2020). Where now for the world's largest energy storage battery in China? <https://www.vanadiumcorp.com/news/industry/where-now-for-the-worlds-largest-energy-storage-battery-in-china/>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

VDA (2020). Verschärfung der EU-Klimaziele verstärkt in Corona-Krise Druck auf die Automobilindustrie. <https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/Verschae-rfung-der-EU-Klimaziele-verst-rkt-in-Corona-Krise-Druck-auf-die-Automobilindustrie.html>, letzter Zugriff am 01.06.2021.

VDA (2021a). Automobilproduktion. Zahlen zur Automobilproduktion im In- und Ausland. <https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/jahreszahlen/automobilproduktion.html>, letzter Zugriff am 01.06.2021.

VDA (2021b). Monatszahlen. <https://www.vda.de/de/services/zahlen-und-daten/monatszahlen.html>, letzter Zugriff am 01.06.2021.

VDI/VDE-IT (tbp). Noch unveröffentlichte Publikation der wissenschaftlichen Begleitung zur Fördermaßnahme Batteriezellfertigung, VDI/VDE-IT GmbH (Hrsg.)

Verivox (2020). Elektroauto vs. Verbrennungsmotor: Kostenvergleich. <https://www.verivox.de/elektromobilitaet/ratgeber/elektroauto-vs-verbrennungsmotor-kostenvergleich-1000990/>, letzter Zugriff am 15.04.2021.

Volkswagen (2019a). Lithium zu Lithium, Mangan zu Mangan. Batterie-Recycling-Anlage. <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/02/lithium-to-lithium-manganese-to-manganese.html>, letzter Zugriff am 01.06.2021.

Volkswagen (2019b). Batteriezellfertigung: Pilotlinie gestartet. <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/09/battery-cell-assembly--pilot-line-started.html>, letzter Zugriff am 28.05.2021.

Volkswagen (2020a). Die CO₂-Bilanz des Elektro-Fahrzeugs. <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2021/02/e-mobility-is-already-this-much-more-climate-neutral-today.html>, letzter Aufruf: 08.06.2021.

Volkswagen (2020b). Volkswagen setzt sich für verbesserte Arbeitsbedingungen im Kleinstbergbau von Kobalt im Kongo ein. <https://www.volkswagenag.com/de/news/2020/11/Volkswagen-engages-in-improving-working-conditions-in-artisanal-cobalt-mines-in-the-Democratic-Republic-of-Congo.html>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Volkswagen (2020c). Story: „Der große Kostenvergleich: E-Auto vs. Verbrenner“. <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/bilder/detail/story-der-grosse-kostenvergleich-e-auto-vs-verbrenner-32850>, letzter Zugriff am 28.05.2021.

Volkswagen (2021a). K wie Kobalt. <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/k-wie-kobalt-4854>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Volkswagen (2021b). Power Day: Volkswagen präsentiert Technology-Roadmap für Batterie und Laden bis 2030. <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/power-day-volkswagen-praesentiert-technology-roadmap-fuer-batterie-und-laden-bis-2030-6891>, letzter Zugriff am 17.05.2021.

Werwitzke, C. (2020a). Fortum, BASF und Nornickel planen Recycling-Cluster. <https://www.electrive.net/2020/03/07/fortum-basf-und-nornickel-planen-recycling-cluster/>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Werwitzke, C. (2020b). CATL beauftragt Hoppecke mit Batterie-Services in Europa. <https://www.electrive.net/2020/07/28/catl-beauftragt-hoppecke-mit-batterie-services-in-europa/>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Werwitzke, C. (2020c). 23 europäische Länder launchen IP-CEI Wasserstoff. <https://www.electrive.net/2020/12/18/23-europaeische-laender-launchen-ipcei-wasserstoff/>, letzter Zugriff am 30.05.2021.

Werwitzke, C. (2021). ElringKlinger verbucht Auftrag über Zellkontaktiersysteme. <https://www.electrive.net/2021/03/09/elringklinger-verbucht-auftrag-ueber-zellkontaktiersysteme/>, letzter Zugriff am 31.05.2021.

Whiteside, J. & Finn-Foley, D. (2019). Supply Chain Looms as Serious Threat to Batteries' Green Reputation. <https://www.greentechmedia.com/articles/read/graphite-the-biggest-threat-to-batteries-green-reputation>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Whoriskey, P. (2016). In your phone, in their air. <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/graphite-mining-pollution-in-china/>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Winkler, M. & Mehl, R. (2021). Finding a new balance in the automotive industry. https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2021/01/Capgemini_New-Balance-in-the-Automotive-Industry_pov_20210129.pdf, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Witsch, K. (2021). Unter dem Rhein liegt Europas größtes Lithium-Vorkommen. <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/elektromobilitaet-unter-dem-rhein-liegt-europas-groesstes-lithium-vorkommen/27037476.html?ticket=ST-6542829-lzIDSbznCzYu4gzdAbzf-ap5>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

Worldbank (2021): Worldwide Governance Indicators 2020. <https://info.worldbank.org/governance/wgi/Home/Reports>, letzter Zugriff am 09.06.2021.

World Economic Forum (2019). A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030 - Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation. https://www3.weforum.org/docs/WEF_A_Vision_for_a_Sustainable_Battery_Value_Chain_in_2030_Report.pdf, letzter Zugriff am 08.06.2021.

World Economic Forum (2020) Global Battery Alliance. <https://www.weforum.org/global-battery-alliance/action>, letzter Zugriff am 31.05.2021.

Zhang, P. (2020). Tesla confirms entry-level China-made Model 3 uses lithium iron phosphate batteries. <https://cn-techpost.com/2020/10/03/tesla-confirms-entry-level-china-made-model-3-uses-lithium-iron-phosphate-batteries/>, letzter Zugriff am 08.06.2021.

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-und Elektronikindustrie e. V. (2021). Position Paper - On the proposal of the EU Commission for a new Battery Regulation. ZVEI. https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2021/Maerz/Proposal_of_the_EU_Commission_for_a_new_Battery_Regulation/Proposal-Battery-Regulation-ZVEI-Position.pdf, letzter Zugriff am 31.05.2021.

4 ANHANG – ROHSTOFFSTECKBRIEFE

4.1 Kobalt

Was sind die relevanten Eigenschaften des Rohstoffs?

Kobalt (Co) ist ein silbergraues Metall und steht im Periodensystem zwischen Eisen und Nickel. Aufgrund seiner besonderen Eigenschaften (Ferromagnetismus, Härte und Verschleißfestigkeit in Legierungen, hoher Schmelzpunkt, niedrige thermische und elektrische Leitfähigkeit, sowie seine Valenzelektronenstruktur mit der sich intensive blaue Farben herstellen lassen) wird Kobalt in verschiedensten Anwendungen eingesetzt.

Wozu braucht man ihn?

Kobalt ist ein wichtiger Bestandteil von vielen Lithium-Ionen-Akkumulatoren und wird in den Kathoden als Oxid (**L**ithium-**C**obalt-**O**xid, **LCO**) oder als Mischoxid (**N**ickel-**M**angan-**C**obalt, **NMC**, oder Lithium-**N**ickel-**C**obalt-**A**luminium-**O**xid, **NCA**) eingesetzt. Im Jahr 2020 wurden etwa 50-60% des global produzierten Kobalts in Batterien verwendet. Das übrige Kobalt fand vorwiegend in Superlegierungen, Karbiden, Diamantwerkzeugen und Magneten Verwendung.

Wie kritisch ist der Rohstoff?

Kobalt wird zumeist als Nebenprodukt in der Kupfer- bzw. der Nickelminenproduktion gewonnen. Die demokratische Republik Kongo dominiert derzeit die Kobaltminenproduktion mit etwa 70% Marktanteil. In Europa existieren bekannte Kobaltreserven in Finnland. Der Anteil an der globalen Förderung betrug hier zuletzt allerdings nur 0,8%. Die Raffinadenproduktion von Kobalt ist konzentriert auf China, Finnland, Kanada, Japan und Australien.

Auch wenn Kobalt nicht als Konfliktmineral eingestuft ist, weist es aufgrund der Rahmenbedingungen des Kleinbergbaus in der demokratischen Republik Kongo dennoch ähnliche Risiken auf. Während das Lieferkettenrisiko im Kontext der Sorgfaltspflicht adressiert werden kann, bleibt das hohe Länderrisiko durch die Konzentration auf Kongo bestehen.²²³ Abbildung 12 zeigt die 9 größten Kobaltminenproduzenten inklusive der Reserven nach Ländern. Diese stehen für etwa 93% der weltweiten Kobaltminenproduktion. Zur Visualisierung des Länderrisikos erfolgt eine Einfärbung anhand des

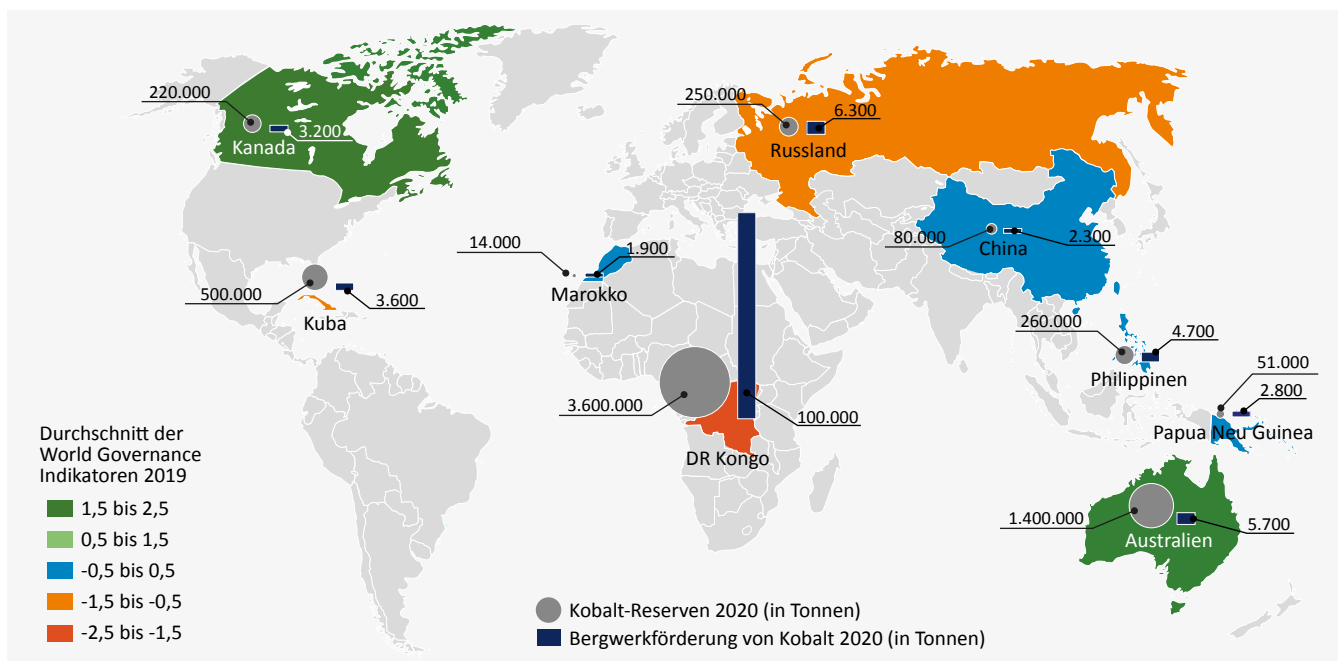


Abbildung 12: Kobaltförderung und Reserven nach Ländern (2020). Farblich dargestellt der World-Governance-Index (Durchschnitt) der Weltbank (2019). Eigene Darstellung nach Schütte, 2021; USGS, 2021a und Worldbank, 2021.

Durchschnitts der sechs World Governance Indikatoren²²⁴ der Weltbank.

Kobalt kann derzeit nicht ohne Performanceverlust in Batterien substituiert werden. Trotzdem haben Batteriezellen ohne Kobalt, vor allem aufgrund des niedrigeren Preises, einen signifikanten Marktanteil. Batterien auf Basis von Lithium-Eisenphosphat (LFP) werden im Jahr 2021 voraussichtlich einen Marktanteil von 25 % erreichen.²²⁵ Gleichzeitig wird intensiv an kobaltreduzierten Kathoden und kobaltfreien Kathoden geforscht.

Wie lange reichen die bekannten Vorkommen?

Die weltweiten Reserven von Kobalt wurden im Jahr 2020 im Rahmen des U.S. Geological Survey (USGS) auf 7,1 Millionen Tonnen geschätzt. Das entspricht der 50-fachen Fördermenge des Jahres 2020. Die weltweiten Ressourcen in Kupfer und nickelhaltigem Sedimentgestein werden auf 25 Millionen Tonnen geschätzt. Weitere 120 Millionen Tonnen Kobaltreserven könnten sich in Manganknollen auf dem Grund des Atlantiks, des Indischen sowie des Pazifischen Ozeans befinden.²²⁶ Aufgrund des hohen Kobaltpreises ist die Rückgewinnung von Kobalt durch Recycling von Batterien bereits heute wirtschaftlich.

Ist die Versorgung der EU sichergestellt?

Die EU ist auf Importe angewiesen. Positiv ist anzumerken, dass Finnland über Kobaltreserven wie auch Raffinadenkapazitäten verfügt.

Ist die Rohstoffgewinnung nachhaltig und menschenrechtskonform?

Ein Großteil der weltweiten Bergwerkförderung von Kobalt entfällt derzeit auf die demokratische Republik Kongo. Historische Verhüttungsaktivitäten haben das Ökosystem geschädigt. Korruption ist bei der Vergabe von Abbaukonzessionen oft ein Problem. Der Kleinbergbau im Kongo bringt Risiken der Arbeitssicherheit und Kinderarbeit.

4.2 Lithium

Was sind die relevanten Eigenschaften des Rohstoffs?

Lithium ist das leichteste Metall im Periodensystem und besitzt eine hohe spezifische elektrische Kapazität (3.86 Ah/g) und ein sehr niedriges Elektrodenpotenzial (-3.04 V gegen Standardwasserstoffelektrode). Diese Eigenschaften machen Lithium zum idealen Material in modernen Batterien insbesondere für Anwendungen mit hoher Energiedichte.

Wozu braucht man ihn?

Lithium ist wesentlicher Bestandteil aller Lithium-Ionen-Batterien und befindet sich dort im Elektrolyten sowie in der Kathode (im entladenen Zustand). Eine Batteriezelle mit dem Kathodenmaterial NMC 111 und einen Kathodenanteil von 35 wt% enthält etwa 2,5 wt% Lithium. Im Jahr 2020 wurden knapp 71% des weltweit produzierten Lithiums für Akkumulatoren verwendet. Weitere Anwendung findet Lithium in der Keramik- und Glasindustrie (14%), bei Schmierstoffen (4%), in Polymeren (2%), im Metallguss (2%) und in der Luftaufbereitung (1%).

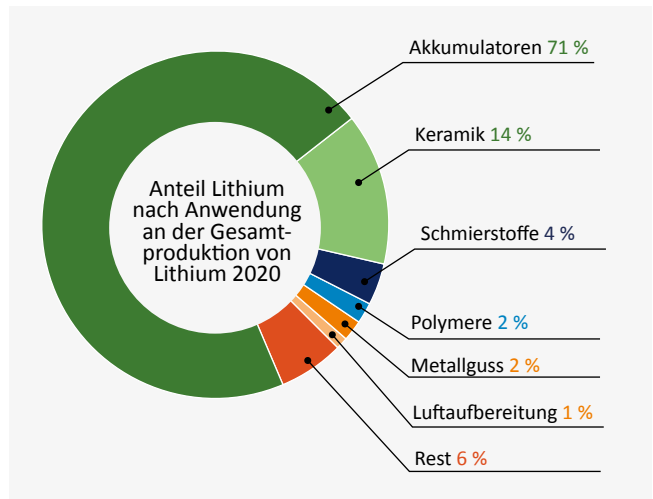


Abbildung 13: Verwendung von Lithium nach Anwendung im Jahr 2020, gemäß USGS, 2021b.

224 Indikatoren: Voice and Accountability, Political Stability and Absence of Violence, Government Effectiveness, Regulatory Quality, Rule of Law und Control of Corruption.

225 Shang, 2021

226 USGS, 2021a

Wie kritisch ist der Rohstoff?

Australien ist in den letzten Jahren zum größten Exporteur von Lithium aufgestiegen. Lithium wird dort im Tagebau aus Festgestein gewonnen. Als Lithiumkonzentrat geht ein Großteil der Exporte nach China, wo es zu Batterievorprodukten und Batteriezellen weiterverarbeitet wird. Chile und Argentinien sind die zweit- bzw. drittgrößten Lithiumlieferanten. Hier wird Lithium aus Sole gewonnen und meist lokal zu Lithiumhydroxid bzw. Lithiumcarbonat weiterverarbeitet. Zusammen stehen diese drei Länder für 90% der weltweiten Lithiumproduktion. Die drei größten Lithiumproduzenten Albemarle, SQM und Tianqi stellten 2019 etwa 50% des weltweit gehandelten Lithiums her. Dies stellt eine hohe Länder- wie auch Firmenkonzentration dar.²²⁷

Der starke Preisanstieg beim Lithium im Jahr 2016 hat zahlreiche Investitionen angestoßen, infolgedessen die Produktionskapazitäten ausgebaut wurden. Es ist davon auszugehen, dass trotz steigender Nachfrage genug Lithium produziert werden kann. An der hohen Länderkonzentration wird sich kurzfristig vorerst nichts ändern. Abbildung 14 zeigt die sieben größten Lithiumminenproduzenten sowie die Länder mit den größten Lithiumreserven. Diese sieben Länder stehen für etwa 99% der weltweiten Lithiumminenproduktion. Zur Visualisierung des Länderrisikos erfolgt eine Einfärbung anhand des Durchschnitts der sechs World Governance Indikatoren der Weltbank.

Eine Substitution in Lithium-Ionen-Batterien ist nicht möglich. Batterietechnologien mit anderen leichten Alkali- und

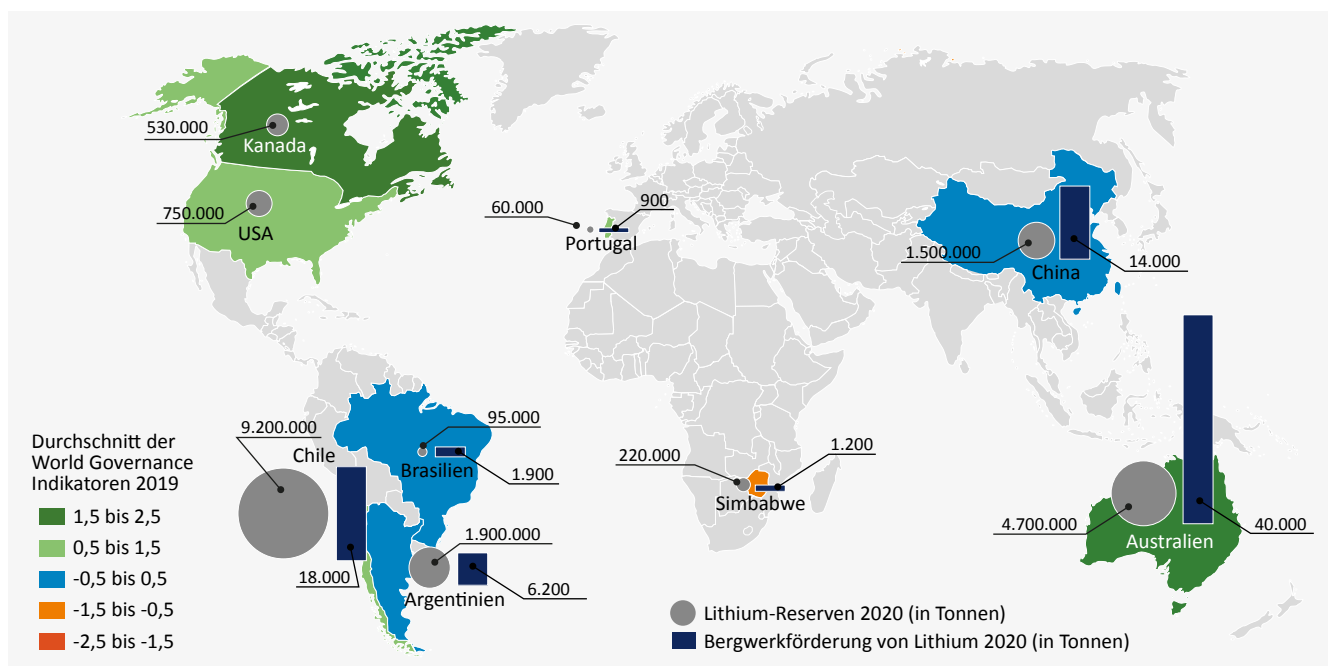


Abbildung 14: Lithiumförderung und Reserven nach Ländern (2020). Farblich dargestellt der World-Governance-Index (Durchschnitt) der Weltbank (2019). Eigene Darstellung nach Drobe, 2020; USGS, 2021b und Worldbank, 2021.

Erdalkalimetallen (Natrium bzw. Magnesium) werden derzeit erforscht oder in Nischenanwendungen genutzt (z. B. Na/NiCl₂-Batterien).²²⁸

Wie lange reichen die bekannten Vorkommen?

Die globale Lithiumproduktion im Jahr 2020 betrug 82.000 Tonnen. Die weltweiten bekannten Lithiumreserven werden derzeit auf 21 Millionen Tonnen beziffert. Das entspricht der 256-fachen Fördermenge im Jahr 2020. Die Angaben zu den weltweiten Ressourcen liegen teilweise weit auseinander. Nach Angaben der amerikanischen USGS aus dem Jahr 2021 liegen die weltweiten Ressourcen bei etwa 86 Millionen Tonnen.²²⁹ Es wird erwartet, dass der Bedarf an Lithium bis zum Jahr 2050 um den Faktor 50 im Vergleich zu 2018 zunehmen wird. Dies entspricht einem Jahresbedarf in Höhe von etwa 19,5% der heute bekannten Reserven, bzw. 5% der heute bekannten Ressourcen. Die Gewinnung von Lithium durch das Recycling von Batterien spielt für die Rohstoffversorgung derzeit noch keine große Rolle.

Ist die Versorgung der EU sichergestellt?

Die EU ist derzeit stark auf Importe angewiesen. Allerdings verfügt Europa über eigene Ressourcen (Jadar, Serbien²³⁰, Oberrheingraben in Süddeutschland²³¹, Zinnwald-Projekt²³² im Erzgebirge), welche derzeit erkundet werden.

Ist die Rohstoffgewinnung nachhaltig und menschenrechtskonform?

Die Rohstoffgewinnung von Lithium findet überwiegend in Ländern mit hohem Governance-Index (Australien, Chile und Argentinien) und überwiegend in dünn besiedelten Gebieten statt. Dennoch sind Konflikte mit der Bevölkerung bezüglich Wassernutzung sehr präsent.

4.3 Graphit

Was sind die relevanten Eigenschaften des Rohstoffs?

Graphit ist eine allotrope Form von Kohlenstoff. Er kann als Erz (natürlicher Graphit) gewonnen oder auch synthetisch hergestellt werden.

Wozu braucht man ihn?

Graphit wird derzeit überwiegend für feuerfeste Materialien z. B. Tiegel, Abdeckungen in Öfen oder als Elektroden für Elektro Stahl sowie als Schmiermittel verwendet. Hochreines Graphit ist derzeit das Standard-Material für die Anoden in Lithium-Ionen-Batterien. Graphit verfügt über eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit, ist sehr stabil auch in stark oxidierender Umgebung und verfügt über die Fähigkeit, Lithium hoch reversibel zu speichern (Laden) und wieder abzugeben (Entladen). Graphit macht etwa 14-19 wt% einer Batterie zelle aus.²³³

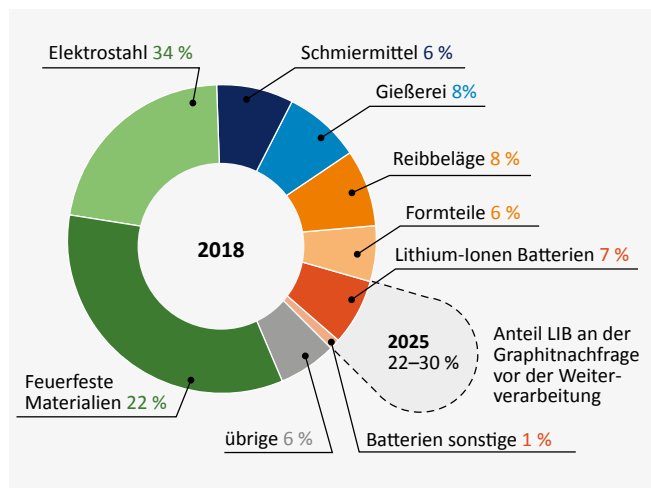


Abbildung 15: Verwendung von Graphit global, gemäß DERA, 2021.

228 Fraunhofer IKTS, 2021

229 USGS, 2021b

230 RioTinto, 2021

231 Schneider, 2021

232 Deutsche Lithium, 2021

233 Damm & Zhou, 2020

Wie kritisch ist der Rohstoff?

Der Rohstoff Graphit ist für europäische Batteriehersteller kritisch aufgrund der hohen Marktkonzentration auf wenige große chinesische und japanische Firmen sowie des Mangels an Substitutionsmöglichkeiten. Das gesamte Graphitangebot wird als ausreichend angesehen und es wird erwartet, dass die Graphitrohstoffproduktion die zukünftige Nachfrage befriedigen können wird.

Die bekannten Graphitreserven sind weltweit verteilt und werden auf etwa 300 Millionen Tonnen abbaubare Reserven geschätzt. Etwa 24% davon befinden sich in China. Große Reserven befinden sich zudem in der Türkei (30%) und in Brasilien (25%). Mit etwa 1,05 Mio. Tonnen macht der Anteil europäischer Reserven weniger als 1% der globalen aus. Die Ressourcen in Europa werden auf 11 m Tonnen geschätzt. Bei der Produktion von natürlichem Graphit nimmt China eine dominante Rolle ein. Knapp 70% der weltweiten Produktion

von natürlichem sowie 50% des synthetischen Graphits entfiel im Jahr 2018 auf China.²³⁴ Die Aufbereitungsschritte des Rohstoffs Graphit hin zum Batteriematerial Graphit werden zu 95% in China und Japan durchgeführt.²³⁵

Die Substitutionsmöglichkeiten sind begrenzt. Für Nischenanwendungen kann Graphit durch Lithium-Titan-Oxid (LTO) ersetzt werden. In der Regel ist dies allerdings mit höheren Kosten und niedrigeren Energiedichten verbunden. In der Forschung wird eine Substitution durch Silizium untersucht. Derzeit kann Silizium mit etwa 5-10% allerdings nur zu einem kleinen Teil dem Graphit zugesetzt werden. Die Anoden von Feststoffbatterien bestehen aus Lithiummetall und benötigen folglich kein Graphit, allerdings sind diese aber noch viele Jahre von der Markteinführung entfernt. Es ist deshalb davon auszugehen, dass Graphit noch längere Zeit das dominierende Anodenmaterial bleiben wird.

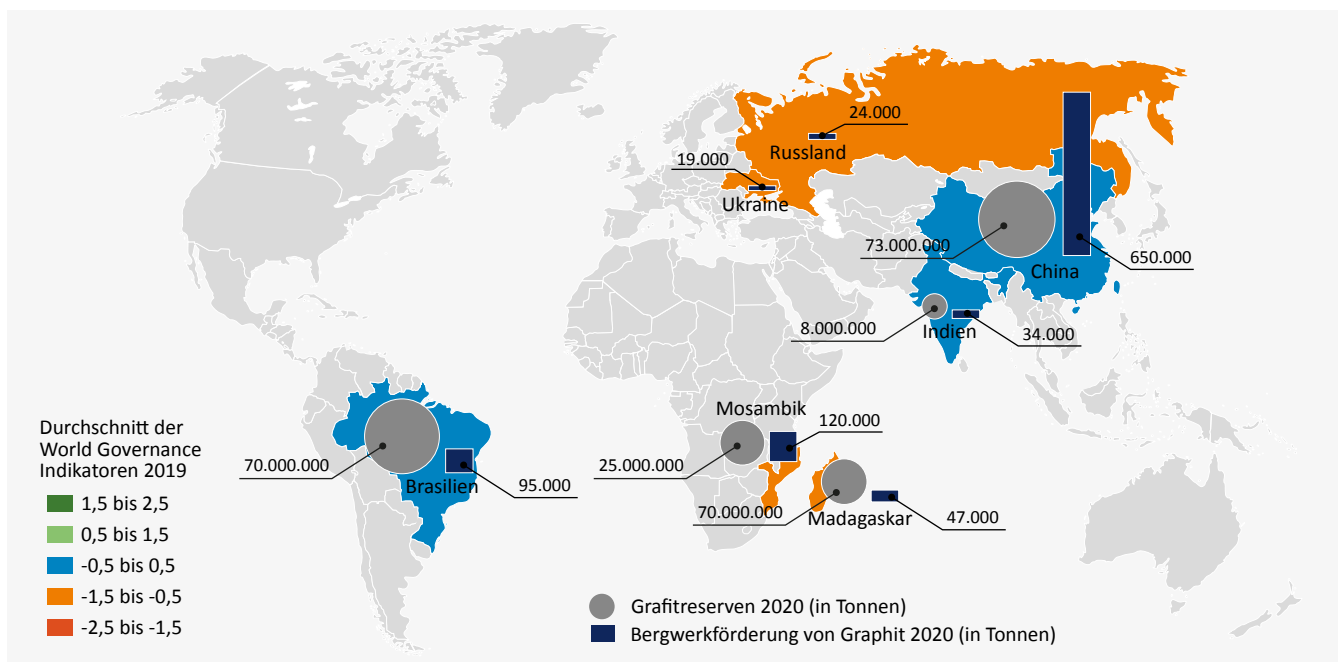


Abbildung 16: Graphitförderung und Reserven nach Ländern (2020). Farblich dargestellt der World-Governance-Index (Durchschnitt) der Weltbank (2019). Eigene Darstellung nach Damm & Zhou, 2020; USGS, 2021c und Worldbank, 2021.

234 Damm & Zhou, 2020

235 RAM, 2020

Wie lange reichen die bekannten Vorkommen?

Im Jahr 2018 betrug die weltweite Mienenproduktion von natürlichem Graphit etwa 1,64 Millionen Tonnen. Demgegenüber stehen etwa 300 Millionen Tonnen bekannte Graphitreserven. Das entspricht der 182-fachen Fördermenge im Jahre 2018. Zusätzlich kann Graphit synthetisch hergestellt werden. Ein Recycling von Graphit aus Lithium-Ionen-Batterien findet aus wirtschaftlichen Gründen noch nicht statt.

Ist die Versorgung der EU sichergestellt?

Auf Europa entfallen derzeit nur etwa 2% der weltweiten Minenproduktion für Graphit, wodurch sich eine sehr starke Importabhängigkeit ergibt. Etwa 175.000 t natürlicher Graphit wurden im Jahr 2018 in die EU eingeführt. Das entspricht 30% der globalen Importe. Aufgrund des Versorgungsrisikos hat die EU natürlichen Graphit als kritischen Rohstoff eingestuft. Abbildung 16 zeigt die sieben größten Graphitminenproduzenten sowie die Länder mit den größten Graphitreserven. Diese sieben Länder stehen für etwa 90% der weltweiten Graphitminenproduktion. Zur Visualisierung des Länderrisikos erfolgt eine Einfärbung anhand des Durchschnitts der sechs World Governance Indikatoren der Weltbank.

Ist die Rohstoffgewinnung nachhaltig und menschenrechtskonform?

Die Rohstoffgewinnung von Graphit sowie dessen Weiterverarbeitung ist mit hohem Energieverbrauch und Umweltbelastungen verbunden und findet vorwiegend in Ländern mit niedrigen Umweltstandards statt.²³⁶

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Ausgewählte Ziele und Unterziele der SDG's für nachhaltige Entwicklung mit hoher Relevanz für die Batteriezellfertigung. Eigene Darstellung.	7
Abbildung 2: Auf die Speicherenergie normierte Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von NMC-basierten Batterien in kg CO ₂ -eq pro kWh. Identische Quellen sind je Technologie farblich codiert. Eigene Darstellung.	11
Abbildung 3: Well-to-wheel-Betrachtung: THG Emissionen und Energiebedarf verschiedener Antriebstechnologien bzw. Energiequellen (f=fossil; mix=EU Strommix; EE= erneuerbare Energien). Nach JEC Well-To-Wheels report v5.	13
Abbildung 4: Teilnehmende und Standorte der durch das IPCEI on Batteries und IPCEI EuBatIn geförderten Vorhaben. Die Farben hinter den Unternehmen geben an, welche Wertschöpfungsstufen die Vorhaben adressieren. Eigene Darstellung.	20
Abbildung 5: Europäische Initiativen zur Etablierung eines nachhaltigen Batterie-Ökosystems und deren Maßnahmen. Eigene Darstellung.	23
Abbildung 6: Mögliche Pfade für die Verwertung von Altbatterien. Die dunkelgrau unterlegten Kästchen zeigen die regulatorischen Ansätze zur Stärkung einer Batterie-Kreislaufwirtschaft. Eigene Darstellung.	29
Abbildung 7: Abschätzung $Batt_{Energie}/Prod_{Energie}$ in Abhängigkeit der Zyklenzahl für den 1. Lebenszyklus sowie zwei 2. Lebenszyklen. Eigene Darstellung.	33
Abbildung 8: Vergleich der laufenden Kosten zwischen E-Pkw und Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, gemäß Volkswagen, 2020c.	43
Abbildung 9: Prognostizierte Kostenentwicklungen der Batteriepackkosten bis 2030 (gemäß Lutsey/Nicholas 2019).	44
Abbildung 10: Abschätzungen der globalen E-Pkw-Neuzulassungen in % und sich daraus ergebender LIB-Bedarf in GWh jeweils bis 2050, gemäß Thielmann et al., 2018.	45
Abbildung 11: Bilanz der Beschäftigung in der Automobilindustrie ausgehend von etwa 848 Tsd. Beschäftigten in 2019, von denen rund 422 Tsd. direkt mit der Herstellung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor verbunden sind (schraffierter Bereich). Rückgang bis 2030 nach Schätzung des ifo-Instituts durch Steigerung des Anteils von EV auf 47%. Zunahme auf Basis der Erkenntnis der Boston Consulting Group, dass bei der Produktion von BEV derzeit etwa 4% weniger Arbeitsstunden bei den OEM anfallen. Eigene Darstellung gemäß Falk et al., 2021 und Niese et al., 2021.	49
Abbildung 12: Kobaltförderung und Reserven nach Ländern (2020). Farblich dargestellt der World-Governance-Index (Durchschnitt) der Weltbank (2019). Eigene Darstellung nach Schütte, 2021; USGS, 2021a und Worldbank, 2021.	67
Abbildung 13: Verwendung von Lithium nach Anwendung im Jahr 2020, gemäß USGS 2021b.	68
Abbildung 14: Lithiumförderung und Reserven nach Ländern (2020). Farblich dargestellt der World-Governance-Index (Durchschnitt) der Weltbank (2019). Eigene Darstellung nach Drobe, 2020; USGS, 2021b und Worldbank, 2021.	69
Abbildung 15: Verwendung von Graphit global, gemäß DERA, 2021.	70
Abbildung 16: Graphitförderung und Reserven nach Ländern (2020). Farblich dargestellt der World-Governance-Index (Durchschnitt) der Weltbank (2019). Eigene Darstellung nach Damm & Zhou, 2020; USGS, 2021c und Worldbank, 2021.	71

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

3TG	Tin, Tungsten, Tantal, and Gold (Zinn, Wolfram, Tantal und Gold)
ACC	Automotive Cells Company
BAFA	Bundesamt für Ausfuhrkontrolle
BEV	Battery Electric Vehicle (dt.: [batterie-elektrisch betriebenes] Elektrofahrzeug)
BESS	Batterie-Energiespeichersystem (stationärer Speicher)
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BattVO-E	Batterie Verordnungsentwurf
BMS	Batterie-Managementsystem
CASE	Connected, autonomous, shared, electric
CIRAF	Cobalt Industry Responsible Assessment Framework
CO ₂ -eq	Äquivalente von Kohlenstoffdioxid. Häufig als wirkgleiche Zusammenfassung von Treibhausgasen
CMRT	Conflict Mineral Report Template
DoD	Depth-of-Discharge
EBA	European Battery Alliance (Europäische Batterie Allianz)
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EIT	European Institute of Innovation and Technology
E-Pkw	Elektro-Personenkraftwagen
ERMA	European Raw Material Alliance
ETIP	European Technology and Innovation Platform
EU	European Union
EuBatIn	European Battery Innovation
EU-ETS	Europäischer Emissionshandel (European Union Emissions Trading System)
ESS	Energiespeichersystem
EV	Electric-Vehicle (Elektroauto)
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
F&E	Forschung & Entwicklung
GBA	Global Battery Alliance
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GRI	Global Reporting Initiative
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle (Fahrzeug mit Verbrennungsmotor)

ILC	International Lithium Corporation
IPCEI	Important Projects of Common European Interest
IRMA	Initiative for Responsible Mining Assurance
JV	Joint Venture
KPI	Key Performance Indicator
KSZ	Klimaschutzziele
LCA	Life Cycle Assessment
Lkw	Lastkraftwagen
LiCoO ₂	Lithiumcobaltoxid
nEHS	Nationales Emissionshandelssystem
NMC	Nickel Mangan Kobalt
NPM	Nationale Plattform Zukunft der Mobilität
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OEM	Original Equipment Manufacturer
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
RMI	Responsible Minerals Initiative
SBT	Science Based Targets
SDGs	Sustainable Development Goals
SoH	State-of-Health
THG	Treibhausgas. Häufig als wirkungsgleiche Äquivalente von Kohlenstoffdioxid (CO ₂ -eq) angegeben.
TCO	Total Cost of Ownership
t-w	Tank-to-wheel
TWh	Terrawattstunde
UN	United Nations (Vereinte Nationen)
UNEP	United Nations Environment Programm
VDA	Verband der Deutschen Automobilindustrie
WEF	Weltwirtschaftsforum
w-t	Well-to-tank - sinngemäß: „vom Bohrloch bis zum Tank“, ist eine Betrachtungsweise des Aufwandes zur Bereitstellung der Antriebsenergie bei Kraftfahrzeugen von der Primärenergiegewinnung bis zur Bereitstellung für das Fahrzeug.
w-t-w	Well-to-Wheel – wörtlich: „vom Bohrloch bis zum Rad“ ist eine Betrachtungs- bzw. Analysemethode des Energiebedarfs von der Primärenergiegewinnung bis zur Traktion des Fahrzeugs.

GLOSSAR

Altbatterien, -akkumulator: Batterien oder Akkumulator am Ende des Lebenszyklus

Akkumulator: Aufladbarer elektrochemischer Energiespeicher

Batterie(n): Im Kontext dieser Studie wird der Begriff Batterien übergreifend sowohl für primäre (nicht-aufladbare) als auch sekundäre (aufladbare) elektrochemische Energiespeicher verwendet.

Batterieverordnungsentwurf: Entwurf der Europäischen Kommission zur Modernisierung der EU-Rechtsvorschriften für Batterien

Bruttostrombedarf: Der Bruttostrombedarf umfasst den Endenergiebedarf an Strom, sowie die damit einhergehenden Umwandlungs- und Übertragungsverluste.

Dekarbonisierung: Reduzierung der CO₂- sowie weiterer Treibhausgasemissionen

Emissionsbudget: Das Emissionsbudget bezeichnet die Menge an Treibhausgasen, die noch freigesetzt werden darf, um mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit die Erderwärmung über ein bestimmtes Temperaturniveau zu vermeiden.

Gigafactories: Bezeichnung für Produktionsstandorte, die jährlich Batteriezellen im Gigawattstundenmaßstab produzieren

Glider: In der LCA eine übliche Bezeichnung für das Restfahrzeug ohne Antriebsstrang.

Gerätebatterien: Batterien oder Akkumulatoren, die in (tragbaren) elektronischen Geräten eingesetzt werden.

Hydrometallurgische Recyclingverfahren: Recyclingverfahren bei dem Bestandteile über nasschemische Prozesse zurückgewonnen werden. Im Gegensatz zur Pyrometallurgie können diese Recyclingschritte bei vergleichsweise geringen Temperaturen durchgeführt werden.

Industriebatterien: Batterien, die für Industrieanwendungen konzipiert sind

Klimaneutralität: Keine Beeinflussung des Klimas durch Prozesse oder Tätigkeiten

Lebenszyklusanalyse: Analyse der Auswirkung von Produkten auf die Umwelt während des gesamten Produkt-Lebenszyklus

Modal Split: Verteilung des Verkehrsaufkommen auf unterschiedliche Verkehrsträger oder -mittel

Non-Profit Organisation: Eine Organisation, die keine wirtschaftlichen Gewinnziele verfolgt.

Plug-In Hybrid: Fahrzeug, das sowohl einen Verbrennungsmotor als auch einen Elektromotor hat. Die Batterie zum Betrieb des Elektromotors kann zusätzlich über einen externen Anschluss geladen werden.

Power-to-Gas: Verfahren bei dem Gase durch den Einsatz von Strom aus Wasser gewonnen werden.

Rezyklat: Aus einem verbrauchten Produkt zurückgewonnenes Material, das für eine neues Produkt genutzt werden kann.

Reserven: Bezeichnet im Kontext Rohstoffe, sicher nachgewiesene und mit bekannter Technologie nach derzeitigem Stand wirtschaftlich gewinnbare Vorkommen von Rohstoffen.

Ressourcen: Bezeichnet im Kontext Rohstoffe, Vorkommen die noch nicht wirtschaftlich zu fördern sind, weil sie noch nicht ausreichend erkundet sind oder weil eine geeignete Technologie zur Förderung fehlt. Ressourcen sind mengenmäßig in der Regel deutlich größer als Reserven.

Shared Mobility: Shared Mobility ist ein Konzept, bei dem Verkehrsmittel wie beispielsweise Fahrräder oder Autos gemeinschaftlich genutzt werden.

Second-Life Batterien: Batterien, die bereits in einer ersten Anwendung eingesetzt wurden und anschließend (unter Umständen nach einer entsprechenden Aufbereitung) in einer zweiten Anwendung Verwendung finden.

Spill-Over: Die Auswirkung von Ergebnissen oder Zuständen auf andere Ergebnisse oder Zustände wird als Spill-Over-Effekt (auch Übertragungseffekt) bezeichnet.

State-of-Health: Der „Gesundheitszustand“ der Batterien gibt an, wieviel Kapazität / Energie im Vergleich zum Ausgangszustand nutzbar ist. In der Regel verringert sich die nutzbare Kapazität / Energie im Laufe des Lebenszyklus einer Batterie.

Stationäre Speicher: Energiespeicher für stationäre Anwendungen, die beispielsweise zur Zwischenspeicherung von erneuerbaren Energien genutzt werden.

Strommix: Der Strommix setzt sich aus Strom zusammen, der aus unterschiedlichen Stromquellen (Kohlekraft, Atomkraft, erneuerbare Energien, ...) gewonnen wird.

Traktionsbatterie: Batterien, die speziell für die Stromversorgung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen für den Straßenverkehr ausgelegt sind

Treibhausgas: Gase, die durch Ansammlung in der Atmosphäre zur Erderwärmung beitragen

Treibhausgasneutral: Es werden nicht mehr Treibhausgase emittiert als kompensiert werden können. Die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre bleibt folglich konstant.

Zellproduktion/-fertigung: Kurzform für Batteriezellproduktion/-fertigung

Zirkuläre Geschäftsmodelle: Geschäftsmodelle, die dazu beitragen, natürliche Ressourcen nicht nur zu verbrauchen, sondern diese durch eine Kreislaufführung weiter nutzbar zu machen.

