

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK

Volkswirtschaftliche Bedeutung und Entwicklung von Batterieproduktion und -recycling in Deutschland

KSVE20302050

Kurzbericht

Zürich und Freiburg, 16. August 2022

Martin Peter, Vanessa Angst, Caspar Esche (INFRAS)

Matthias Buchert, Peter Dolega (Öko-Institut)

Impressum

Volkswirtschaftliche Bedeutung und Entwicklung von Batterieproduktion und -recycling in Deutschland

KSVE20302050

Zürich und Freiburg, 16. August 2022

Auftraggeber

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK
Referat KB6

Autorinnen und Autoren

Martin Peter, Vanessa Angst, Caspar Esche (INFRAS)
Matthias Buchert, Peter Dolega (Öko-Institut)

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

info@infras.ch

Öko-Institut e.V., Merzhauser Str. 173, 79100 Freiburg im Breisgau

Tel. +49 761 452950

info@oeko.de

Inhalt

Summary	4
1. Ausgangslage	5
2. Methodisches Vorgehen	7
3. Qualitative Einordnung der Bedeutung	9
4. Heutige Bedeutung Batterieproduktion und -recycling	15
4.1. Volkswirtschaftliche Bedeutung in der Literatur	15
4.2. Volkswirtschaftliche Bedeutung 2020	22
5. Bedeutung der Batterieproduktion und -recycling 2030/2050	24
5.1. Zukunftsszenarien in der Literatur	24
5.2. Definition der Szenarien	30
5.3. Volkswirtschaftliche Bedeutung 2030, 2050	32
6. Synthese/Einordnung	37
Annex	41
A1. Literaturrecherche	41
A2. Volkswirtschaftliche Bedeutung 2020, 2030, 2050	45
Literatur	46

Summary

- Die Förderung der E-Mobilität spielt im Zug der Dekarbonisierung des Verkehrs eine zentrale Rolle. Der Wandel hin zur Elektromobilität ist mit grossen Veränderungen in der deutschen Automobilindustrie verbunden. Deshalb ist es zentral, die positiven Potentiale der neuen Marktsegmente «Batterieproduktion» und «Batterierecycling» zu analysieren.
- Die vorliegende Analyse untersucht deshalb die heutige volkswirtschaftliche Struktur und Relevanz der Produktion und des Recyclings von Batterien für E-Fahrzeuge (Pkw) in Deutschland. Sie zeigt mögliche Potenziale zukünftiger Szenarien auf. Die Studie analysiert alle Wertschöpfungsstufen der Batterieproduktion für E-Fahrzeuge ausser Forschung und Entwicklung. Die Analyse fokussiert auf Antriebsbatterien, Starterbatterien sind nicht betrachtet.
- Die Sektoren Batterieproduktion und -recycling sind heute (2020) in Deutschland mit einer Wertschöpfung von 600 Mio. Euro und 3.000 Beschäftigten noch kaum bedeutend. Deutsche Fahrzeugproduzenten bauen heute aus dem Ausland eingekaufte Batteriezellen zu Modulen und Batteriepacks zusammen. Die übrigen Wertschöpfungsstufen sind heute im Ausland angesiedelt. Lithium-Ionen-Batterien werden seit einigen Jahren in Deutschland recycelt, jedoch noch in sehr geringem Umfang.
- Für den Ausblick in die Jahre 2030 und 2050 analysieren wir zwei unterschiedliche Entwicklungsszenarien für den Batteriemarkt. Beide Szenarien unterstellen einen Dekarbonisierungspfad, welcher sich an der Eröffnungsbilanz des neuen BMWK orientiert und von einer starken Durchdringung der Elektromobilität ausgeht.
 - Szenario 1: Im ersten Szenario ist unterstellt, dass die deutsche Automobilindustrie ihre internationale Wettbewerbsposition halten und somit eine relevante Batterieproduktion und ein bedeutendes Batterierecycling aufbauen kann. Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Batteriebranche steigt dabei stark an (2030: 59.000 Arbeitsplätze (AP), 13,3 Mrd. Euro Wertschöpfung (WS) / 2050: 74.000 AP, 19,8 Mrd. Euro WS).
 - Szenario 2: Im zweiten Szenario verliert Deutschland bei der Automobilherstellung an Wettbewerbsfähigkeit. Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Batteriebranche fällt in diesem Szenario erheblich kleiner aus als in Szenario 1 (2030: 27.000 AP, 6,7 Mrd. Euro WS / 2050: 26.000 AP, 6,3 Mrd. Euro WS).
- Die vorliegende Analyse macht deutlich, dass der Aufbau der Batterieproduktion und -recycling in Deutschland eine wichtige Rolle spielt, um dem durch den Strukturwandel bedingten Wegfall von Arbeitsplätzen beim eigentlichen Fahrzeugbau in der Zukunft entgegenzuwirken. Die vorliegende Analyse stellt jedoch noch keine gesamtwirtschaftliche Nettobetrachtung aller Einflusskanäle dar, welche im Zuge der Antriebswende wichtig sind.

1. Ausgangslage

Damit Deutschland die Klimaschutzziele erreichen kann, muss auch der Verkehrsbereich einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten: Die Förderung der E-Mobilität spielt hierbei eine zentrale Rolle. Der Wandel hin zur Elektromobilität im In- und Ausland ist mit großen Veränderungen verbunden. Dies gilt insbesondere für die deutschen Automobilhersteller und deren Zulieferer. Damit die deutschen Automobilhersteller und deren inländische Zulieferer bei diesem Strukturwandel nicht erheblich an internationaler Wettbewerbsfähigkeit einbüßen, sollte Deutschland technologisch in der Elektromobilität Spitzen-Know-how aufbauen und erhalten. Dabei kann bei der starken Position im Bereich Ingenieurwesen angesetzt werden, es braucht aber weitere Anstrengungen gegenüber der aktiven ausländischen Konkurrenz. Dies gilt speziell auch beim Ausbau der **Batterieproduktion** in Deutschland, genauer der Batteriezellenfertigung¹, welche einen großen Teil der Wertschöpfung der Elektromobilität ausmacht. Können deutsche Produzenten Marktanteile gewinnen und behaupten, so trägt dies zur Abfederung der negativen Auswirkungen in der rückläufigen Produktion fossil betriebener Fahrzeuge bei. Neben dem Einsatz emissionsarmer Fahrzeugtypen sind für die Verkehrswende – im Sinne der Stärkung der Kreislaufwirtschaft und des Produktionsstandortes Deutschland – auch ganzheitliche Konzepte für die Produktion, Weiterverwendung und **Recycling von Batteriesystemen** zentral. Denn Elektromobilität ist nur dann nachhaltig, wenn Batterien nach dem Einsatz in Fahrzeugen weiterverwendet und vor allem effizient recycelt werden können. Altbatterien aus Elektrofahrzeugen sind z.T. noch gut geeignet, um anderweitig eingesetzt zu werden. Beispiele sind stationäre Anwendungen zum Speichern von Strom bei Windkraftanlagen oder PV-Freiflächenanlagen oder auch im gewerblichen Bereich (Second-Life-Einsatz). Dies verlängert die Nutzungsphase und kann zu einem ressourceneffizienten Wirtschaften beitragen. Unabhängig davon, ob eine Batterie wiederverwendet wird oder nicht, ist das Recycling essenziell. Die Batterie wird dabei wieder in die Einzelbestandteile zerlegt und wertvolle Rohstoffe wie Nickel-, Kobalt- oder Lithiumverbindungen werden zurückgewonnen und im Idealfall in neuen Batterien eingesetzt (End-of-Life-Recycling). Die heutigen Einschätzungen von ExpertInnen zum Second-Life-Einsatz von Batterien unterscheiden sich stark. Deshalb fokussieren wir im vorliegenden Dokument auf das End-of-Life-Recycling. Insbesondere die neue Batterieverordnung der EU, welche im März 2022 vom EU-Parlament auf den Weg gebracht wurde und die alte Batteriedirektive 2006/66/EG ablösen wird, unterstreicht die Wichtigkeit des Recyclings. Hierbei werden ambitionierte materialspezifische Rückgewinnungsquoten ab 2024 sowie Sekundärmetallanteile in neuen Batterien definiert (European Parliament 2022).

¹ Es ist in dieser Skizze mit dem Begriff Batterien immer von Lithium-Ionen-Batterien die Rede, die dem Antrieb der Elektrofahrzeuge dienen. Blei-Säure-Batterien (Starterbatterien) sind nicht im Fokus der Arbeit.

Es ist deshalb wichtig, den in Deutschland potenziell erheblich an Bedeutung gewinnenden Marktsegmenten «Batterieproduktion» und «Batterierecycling» ein spezielles Augenmerk zu widmen. Als Grundlage für politische und volkswirtschaftliche Diskussionen in dem Thema braucht es die Analyse von Marktperspektiven, welche mögliche Entwicklungsszenarien dieser Branchen aufzeigen. Die vorliegende Analyse untersucht deshalb die heutige volkswirtschaftliche Struktur und Relevanz der Produktion und des Recyclings von Batterien für E-Fahrzeuge (Pkw) in Deutschland und zeigt mögliche Entwicklungen und Potenziale zukünftiger Szenarien auf². Die Studie analysiert alle Wertschöpfungsstufen der Batterieproduktion für E-Fahrzeuge, nicht in die Betrachtung einbezogen sind Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Die Analyse fokussiert auf Antriebsbatterien, Starterbatterien werden nicht betrachtet.

Im Kapitel 2 wird das methodische Vorgehen der Arbeit erläutert. Der Kurzbericht ist in einen literaturgestützten Teil und in einen auf Zukunftsszenarien aufbauenden Teil gegliedert. Der literaturgestützte Teil umfasst eine qualitative Betrachtung der aktuellen Batterieproduktion und dem Recycling von Fahrzeugbatterien in Deutschland (Kapitel 3 und 4.1). Darauf folgt eine quantitative Analyse der aktuellen betriebs- und volkswirtschaftlichen Relevanz der betrachteten Wirtschaftsbereiche (Kapitel 4.2). Auf Basis vorhandener Literatur folgt schließlich eine qualitative und quantitative Analyse der zukünftigen betriebs- und volkswirtschaftlichen Relevanz der Branchen „Batterieproduktion“ und „Fertigung von Elektromotoren und Batterierecycling“ (Kapitel 5.1). Das Kapitel 5.2 enthält die Definition der untersuchten Zukunftsszenarien, welche zur Modellierung der volkswirtschaftlichen Bedeutung der Wirtschaftsbereiche Batterieproduktion und Batterierecycling in 2030 und 2050 untersucht werden (Kapitel 5.3). Den Abschluss des Kurzberichts bildet eine Synthese, welche sich auf die Erkenntnisse der literaturgestützten und modellgestützten Analyse stützt (Kapitel 6).

² Die Produktion und das Recycling anderer Batterien, wie z.B. für Elektrorollstühle oder Gabelstapler, werden in der vorliegenden Analyse nicht berücksichtigt.

2. Methodisches Vorgehen

Nach der offiziellen Klassifikation der Wirtschaftszweige des Statistischen Bundesamts sind die zwei Wirtschaftsbereiche Batterieproduktion sowie Fahrzeugbatterierecycling in übergeordneten Wirtschaftszweigen verortet. Die Batterieproduktion ist Teil des Wirtschaftsbereichs WZ 27 Herstellung elektrischer Ausrüstung, genauer WZ 27.2 Herstellung von Batterien und Akkumulatoren. Das Recycling von Batterien ist Teil des Wirtschaftszweigs WZ 38 Sammlung, Behandlung und Beseitigung von Abfällen sowie Rückgewinnung, genauer WZ 38.31 Zerlegen von Schiffs- und Fahrzeugwracks und anderen Altwaren. Der Wirtschaftszweig WZ 38 wird hierbei häufig zusammen mit den Wirtschaftszweigen WZ 37 und WZ 39 als Wirtschaftszweige WZ 37-39 Dienstleistungen der Abwasser-, Abfallentsorgung und Rückgewinnung zusammengefasst (DESTATIS 2008). Die bestehende Differenzierung fällt mitunter wenig trennscharf aus.

Für eine detaillierte Untersuchung der Auswirkungen einer Durchdringung der Elektromobilität auf die drei zu betrachtenden Wirtschaftszweige sowie die gesamten volkswirtschaftlichen Auswirkungen ist eine weitere Differenzierung der Wirtschaftsbereiche sinnvoll. Im Rahmen dieser Analyse wird folglich die Fertigung von Batterien (inkl. Zellen) als Wirtschaftszweig WZ 27.A Batterieproduktion (inkl. Zellen) geführt und als Residualkonto des Wirtschaftszweigs 27 Herstellung elektrischer Ausrüstung dient der Wirtschaftszweig WZ 27.B Restliche Herstellung dieser Branche. Ein ähnliches Vorgehen wird für die Rückgewinnung von Fahrzeugbatterien gewählt, welche unter dem Wirtschaftszweig WZ 38.31.A Rückgewinnung aus Fahrzeugwracks kategorisiert wird. Als Residualkonto der Wirtschaftszweige WZ 37-39 Dienstleistungen der Abwasser-, Abfallentsorgung und Rückgewinnung dient der Wirtschaftszweig WZ 37-39R Restliche Dienstleistungen dieser Branche. Eine Gegenüberstellung der bestehenden Kategorisierung nach DESTATIS (2008) und der weiter differenzierten Kategorisierung im Rahmen dieser Skizze ist in der folgenden Tabelle 1 zu sehen.

Tabelle 1: Wirtschaftsbereiche vor/nach Differenzierung – Batterieproduktion und -recycling

Bestehender Differenzierungsgrad der IOT		Vorschlag der zu differenzierenden Bereichen	
<i>Wirtschaftsbereich</i>	<i>WZ08</i>	<i>Wirtschaftsbereich</i>	<i>WZ08</i>
Batterieproduktion			
Herstellung elektrischer Ausrüstung	27	Batterieproduktion (inkl. Zellfertigung)	27.A
		Restliche Herstellung dieser Branche	27.B
Batterierecycling (bereits vorhanden)			
Dienstleistungen der Abwasser-, Abfallentsorgung und Rückgewinnung	37-39	Rückgewinnung aus Fahrzeugwracks	38.31.A
		Restliche Dienstleistungen dieser Branche (Residualkonto)	37-39R

Tabelle INFRAS. Quelle: Für die zu differenzierenden Gütergruppen orientieren wir uns an den jeweiligen Wirtschaftsbereichen zugehörigen Gruppen gemäß CPA-Kategorisierung (DESTATIS 2008).

Die Auswertung der Literatur zur aktuellen und zukünftigen qualitativen Relevanz sowie volkswirtschaftlichen Kenngrößen erfolgt jeweils nach den drei betrachteten Wirtschaftsbereichen Batterieproduktion, Fertigung von Elektromotoren und Batterierecycling.

3. Qualitative Einordnung der Bedeutung

Die Wertschöpfungskette für Antriebsbatterien (Traktionsbatterien) von Elektrofahrzeugen, für die derzeit und zumindest absehbar nahezu ausschließlich auf Lithium-Ionen-Batterien (LIB) zurückgegriffen wird, kann sehr stark vereinfacht siebenstufig dargestellt werden. Die sieben Stufen der Wertschöpfungskette setzen sich zusammen aus

- der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung,
- der Herstellung von Precursoren (Ausgangsmaterial für Kathoden),
- der finalen Herstellung von Elektroden,³
- der Zellfertigung,
- der Batteriefertigung
- die Nutzungsphase der Batterie sowie
- der Wiederverwendung/Recycling.

Zunächst wird die Relevanz dieser einzelnen Schritte für den Standort Deutschland im Jahr 2020 qualitativ beschrieben.

Batteriewertschöpfungskette in Deutschland 2020 – Aktueller Stand

In der nachfolgenden Grafik ist die Ausgangssituation in Deutschland für die sieben Segmente der Wertschöpfungskette schematisch dargestellt.

Abbildung 1: Batteriewertschöpfungskette in Deutschland 2020 (qualitatives Schema)



Grün: hohe Relevanz in Deutschland, Orange: mittlere Relevanz in Deutschland, Rot: geringe Relevanz in Deutschland

Grafik Öko-Institut. Quelle: Öko-Institut (eigene Zusammenstellung)

Aktuell spielt der Standort Deutschland für die Gewinnung und Verarbeitung von Primärrohstoffen von LIB wie Lithium-, Kobalt-, Nickel- oder Manganverbindungen keinerlei Rolle. So wird der Abbau von natürlichen Metallerzen in Deutschland bereits seit Jahrzehnten nicht mehr betrieben. Weder Deutschland noch die Europäische Union spielen im Bergbau dieser Schlüsselrohstoffe bislang eine entscheidende Rolle. Ausnahmen sind z.B. geringe

³ Eine Lithium-Ionen-Zelle wird aus einer ganzen Reihe von Einzelkomponenten wie Kathoden- und Anodenmaterial, Separator, Zellgehäuse, Ableiterfolien (Kupfer, Aluminium), Elektrolyt (organische Lösungsmittel mit Leitsalz) hergestellt. Die obige Darstellung stellt bewusst ein qualitatives, stark vereinfachtes Schema dar. In den volkswirtschaftlichen Berechnungen in dieser Kurzstudie sind die Wertschöpfungsketten komplett erfasst.

Produktionsmengen für Lithiumverbindungen in Portugal (USGS 2021). An dieser Stelle sei jedoch erwähnt, dass in Deutschland bedeutende Mengen Raffinadekupfer sowohl aus Primär- als auch aus Sekundärquellen (also Recycling) hergestellt werden. Gleiches gilt für Aluminium, welches zusammen mit Kupfer zu den wichtigen Schlüsselmetallen für Lithium-Ionen-Zellen gehört. So werden für ein durchschnittlich großes, 400 Kilogramm schweres Batteriepack – bestehend aus einer Vielzahl an Batteriezellen – neben Aluminium, Stahl und Kunststoffen für das Gehäuse auch rund 6 Kilogramm Lithium, 10 Kilogramm Mangan, 11 Kilogramm Kobalt, 32 Kilogramm Nickel und 100 Kilogramm Graphit auf Zellenebene verarbeitet (ADAC 2019).

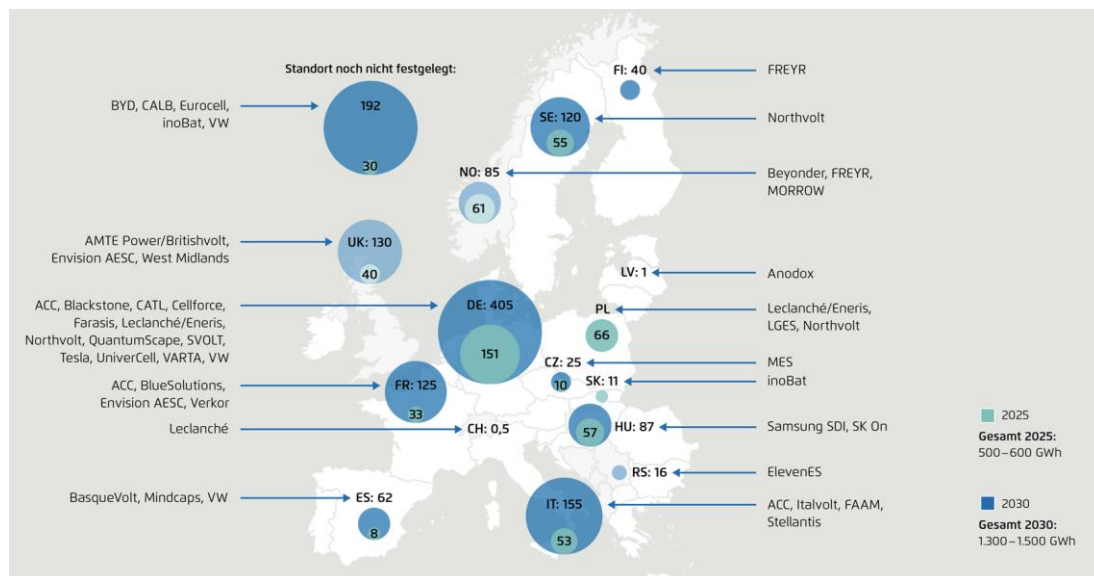
Wie aus dem obigen Schema (Abbildung 1) zu entnehmen ist, hat die Herstellung von Precursoren und Elektrodenmaterial für LIB in Deutschland aktuell keine Relevanz. Dies gilt ebenso für die Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen – letztlich das Herzstück der Wertschöpfungskette; allerdings mit zwei Ausnahmen, der Anlage von Leclanché SA in Willstättin Südwestdeutschland (Leclanché 2020) und die EAS Batteries in Nordhausen/Thüringen (EAS 2022) Batteriezellen für die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien werden in Deutschland von den Automobilherstellern (OEM) aktuell überwiegend aus dem asiatischen Raum importiert. Die Herstellung der fertigen Lithium-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge findet hingegen bereits seit einigen Jahren zu großen Teilen in Deutschland statt. Die großen OEM in Deutschland betreiben hierfür in der Regel eigene Montagewerke, in welchen mit zugekauften Zellen (meist asiatischer Hersteller und den weiteren notwendigen Komponenten (Batteriegehäuse, Batteriemanagementsystem usw.) die mehrere hundert Kilogramm schweren Batteriesysteme fertig zusammengebaut werden (Daimler 2021, Volkswagen 2021, BMW 2020). Weiterhin gibt es in Deutschland mehrere renommierte Batteriehersteller, die mit Hilfe ebenfalls zugekaufter Batteriezellen fertige Lithium-Ionen-Batterien für unterschiedliche Einsatzzwecke produzieren und vermarkten. Zu den Einsatzgebieten gehören hier primär Gabelstapler, Elektrobusse, E-PKW, Pedelecs sowie stationäre Speicher (Akasol 2021, BMZ 2021).

Das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien wird in Deutschland bereits seit einigen Jahren praktiziert, nicht zuletzt gestützt auf umfassende, von der Bundesregierung geförderte Verbundprojekte (LiBRi 2011, LithoRec I 2012, LithoRec II 2016, EcoBatRec 2016). Allerdings weisen diese Anlagen bislang nur Jahreskapazitäten von maximal einigen Tausend Tonnen auf, da der Rücklauf großer Traktionsbatterien aus der Elektromobilität erst in einigen Jahren deutlich höhere Anlagenkapazitäten erfordern wird. Das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien fokussiert daher bislang auf LIB aus Elektrogeräten sowie zunehmend auch aus Pedelecs. Beispiele für Unternehmen in Deutschland, die das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien anbieten, sind Accurec Recycling GmbH in Krefeld (Accurec 2021), Duesenfeld GmbH in Wendeburg (Duesenfeld 2021) sowie Nickelhütte Aue GmbH in Aue (Nickelhütte Aue 2021).

Batteriewertschöpfungskette in Deutschland 2030 – Vorausschau

Durch die sehr dynamische Entwicklung der Elektromobilität in Deutschland und Europa sind gegenüber dem Stand 2020/2021 kurz- und mittelfristig (bis 2030) erhebliche Veränderungen hinsichtlich der Anteile an der Batteriewertschöpfungskette für Deutschland zu erwarten. In der folgenden Übersicht sind bestehende und für die nächsten Jahre geplante Gigafactories, d.h. Anlagen zur Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen mit Kapazitäten im Gigawattstundenbereich pro Jahr, aufgeführt. Es ist augenfällig, dass ein beträchtlicher Teil der geplanten und z.T. schon in Bau befindlichen Gigafactories in Deutschland – dem zentralen Automobilstandort in Europa – entstehen soll. Neben bekannten asiatischen Produzenten von Lithium-Ionen-Zellen wie CATL sind auch europäische Unternehmen wie Northvolt oder ACC aktiv. Die in Deutschland und Europa Stand Mai 2022 angekündigten und z.T. bereits im Bau und Betrieb befindlichen Produktionsanlagen von Batteriezellen sind in Abbildung 2 einsehbar.

Abbildung 2: Angekündigte Zellproduktionskapazitäten in Europa in Gigawattstunden (GWh) (Stand Mai 2022)



Grafik Agora Verkehrswende 2022.

Der sehr dynamische Aufbau von Gigafactories in Deutschland und dem benachbarten Ausland wird das Bild der Batteriewertschöpfungskette bis 2030 entsprechend massiv verändern. Diese Veränderung drückt sich in dem vereinfachten Wertschöpfungsketten-Schema in Abbildung 3 farblich entsprechend aus.

Abbildung 3: Vorausschau Batteriewertschöpfungskette in Deutschland 2030 (qualitatives Schema)



Grün: hohe Relevanz in Deutschland, Orange: mittlere Relevanz in Deutschland.

Grafik Öko-Institut. Quelle: Öko-Institut (eigene Zusammenstellung)

Wie oben bereits ausgeführt, hat die Rohstoffgewinnung von Schlüsselrohstoffen für LIB wie Lithium-, Kobalt- oder Nickelverbindung aus natürlichen Rohstoffen in Deutschland derzeit keine wirtschaftliche Bedeutung. Allerdings sorgt der Boom der Elektromobilität und damit die Nachfrage nach Schlüsselrohstoffen zu einer sich rasch verändernden Investitionslandschaft. Vor allem für die Gewinnung von Lithiumverbindungen aus natürlichen Lagerstätten sind eine Reihe von Projekten in Europa (Portugal, Serbien usw.) angelaufen. Diese Entwicklung wird durch die erhebliche Wachstumsdynamik der E-Mobilität in Europa einerseits und eine erwartete angespannte Versorgungssituation für Lithium aus natürlichen Lagerstätten andererseits befeuert. Zwar sind die natürlichen Ressourcen für Lithium definitiv in ausreichendem Maße vorhanden, Fachleute äußern jedoch die Erwartung, dass das Tempo des Ausbaus von Lithium-Fördermengen mit der sprunghaften Nachfrage nicht schritthalten könnte. Erhebliche Preissteigerungen für gängige Lithiumverbindungen als Ausgangsverbindungen für Lithium-Ionen-Zellen sind daher bereits zu beobachten (Al Barazi 2021).

Die skizzierten Entwicklungen lassen somit mittelfristig nicht ausschließen, dass die Gewinnung von Lithiumverbindungen aus natürlichen Lagerstätten in Deutschland realisiert werden könnte. Mehrere Projekte zur Gewinnung von Lithiumverbindungen aus Tiefengewässern als Nebenprodukt von Geothermieanlagen stehen vor der Pilotphase (EnBW 2021, Vulcan Energy 2021). Hier steht das umfassende Potenzial im Oberrheingraben im Fokus und geplante Pilotanlagen zur kombinierten Gewinnung von erneuerbarer Energie (Wärme und/oder Strom) und Lithiumverbindungen sollen in den kommenden Jahren in Betrieb gehen (Blume und Witsch 2021). Darüber hinaus ist in Osten Deutschlands auch ein Projekt zur Gewinnung von Lithiumverbindungen aus Hartgestein in der Planung (Deutsche Lithium 2021).

Eine Einschätzung zur Realisierung der Gewinnung von Lithiumverbindungen aus natürlichen Lagerstätten in Deutschland ist heute (20220) nur schwer möglich. Ebenso ist der mögliche Mengenbeitrag zum Gesamtbedarf heute kaum sicher einschätzbar. Einerseits sind interessante große Potenziale vorhanden und potenzielle, namhafte Abnehmer haben sich bereits heute zukünftige Fördermengen an Lithiumverbindungen als "Nebenprodukt" der Geothermie aus Tiefenwässern gesichert (Werwitzke 2021). Andererseits kann heute noch nicht

abschließend die wirtschaftliche Relevanz entsprechender Projekte in Deutschland bewertet werden. Auch mögliche Widerstände aus Kreisen der lokalen Bevölkerung gegen Bergbau- oder Geothermieprojekte in Deutschland dürfen nicht unterschätzt werden. Die Gewinnung von Lithiumverbindungen als Nebenprodukt der Geothermie könnte allerdings klare ökologische Vorteile aufweisen, da es sich um CO₂-arm bzw. CO₂-frei hergestellte Lithiumverbindungen handelt. Zur Einschätzung hierfür sind in Zukunft Ökobilanzen unabhängiger Fachleute notwendig. Der Fokus eines möglichen Batterierohstoffabbaus liegt in Deutschland aber eindeutig nur auf Lithium. Andere Batterierohstoffe wie Nickel, Kobalt usw. werden sehr wahrscheinlich nicht in Deutschland gefördert werden – entsprechende Projekte sind auch im Gegensatz zu Lithium nicht bekannt.

Da sowohl die Nutzung der Lithium-Ionen-Batterien durch den Vormarsch der Elektromobilität als auch die Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen (Gigafactories) und der Lithium-Ionen-Batterien (bereits heute realisiert) in Deutschland in den nächsten Jahren eine sehr hohe wirtschaftliche Bedeutung erlangen werden, sind auch signifikante Impulse auf die vorgelagerten Segmente der Wertschöpfungskette klar erkennbar.

Im Jahr 2021 hatte die Produktion von Prekursoren und Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Zellen in Deutschland noch keine Relevanz. Allerdings sind in jüngster Zeit im Windschatten des Aufbaus und der erwartbaren Inbetriebnahme der Gigafactories für die Batteriezellenerfertigung eine Reihe wichtiger Investitionsentscheidungen getroffen worden: In Bitterfeld in Sachsen-Anhalt plant der niederländische Konzern AMG ab 2023 die Produktion von jährlich rund 20 Tsd. Tonnen batteriefähigem Lithiumhydroxid. Der Baubeginn für die Anlage – eine sogenannte "Lithiumraffinerie" – mit einer Investitionssumme von 103 Mio. Euro ist für das 1. Quartal 2022 geplant (von der Eltz 2021). In Guben in Brandenburg plant das kanadische Unternehmen Rock Tech ab 2024 die Produktion von jährlich 24 Tsd. Tonnen batteriefähigem Lithiumhydroxid. Die Investitionssumme soll 470 Mio. Euro betragen (rbb 2021). Und ab 2022 wird die BASF in Schwarzheide in Brandenburg Kathodenmaterial mit einem Mengenäquivalent für 400 Tsd. vollelektrische Fahrzeuge produzieren (BASF 2020).

Produktion von Elektromotoren in Deutschland

Deutschland hat traditionell eine starke wirtschaftliche Position im Anlagen- und Maschinenbau und auch im Teilsegment Elektromotorenproduktion. So wurden z.B. im Jahr 2012 rund 50% aller in der EU produzierten Servomotoren (Synchronmotoren mit Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagneten) in Deutschland produziert (Buchert et al. 2014). Neben großen Unternehmen wie Siemens, ZF Friedrichshafen oder SEW Eurodrive produzieren auch zahlreiche mittelständische Unternehmen Elektromotoren für diverse technische Anwendungen. Nachdem Elektromotoren früher in erster Linie in industriellen Prozessen (z.B. für Werkzeugmaschinen)

zum Einsatz kamen, wächst seit Jahren mit den Antriebsmotoren für Elektrofahrzeuge ein weiterer Massenmarkt heran, dessen Wachstumsdynamik sowohl in Deutschland aber auch global in den nächsten Jahren und Jahrzehnten noch weiter zulegen wird (Buchert et al. 2014). Von den im ersten Halbjahr 2021 weltweit produzierten elektrischen Antriebsmotoren waren 92,1% Synchronmotoren mit Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagneten. Es wird darauf verwiesen, dass der ungebrochen hohe Anteil an Synchronmotoren angesichts einer Verdopplung der Preise für Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnete die hohen Effizienzvorteile dieser Motoren unterstreicht (Adamas Intelligence 2021).

Neben traditionellen Herstellern von Elektromotoren haben auch die Automobilhersteller in Deutschland eigene Produktionskapazitäten für die elektrischen Antriebsmotoren ihrer Fahrzeugmodelle aufgebaut bzw. bauen sie in näherer Zukunft aus. So ist das VW-Werk bei Kassel innerhalb der Volkswagen-Konzerns in Deutschland Standort für die Elektromotorenproduktion der Elektroauto-Familie ID. Doch auch Daimler und BMW planen einen starken Ausbau ihrer Elektromotorfertigung an deutschen Standorten (siehe Kapitel 5.1).

Batterierecycling in Deutschland 2030 – Vorausschau

Mit der zunehmenden Marktdurchdringung der Elektromobilität im deutschen Pkw-Markt ist bis 2030 mit einem deutlichen Zuwachs verbrauchter Lithium-Ionen-Batterien aus Fahrzeugen zu rechnen, welche dem Recycling zugeführt werden. Dieser Rücklauf wird nach 2030 noch deutlich stärker ansteigen. Selbst wenn ein Teil dieser aus den Altfahrzeugen ausgebauten Lithium-Ionen-Batterien für eine Zweitnutzung (z.B. als stationäre Energiespeicher) temporär geeignet sein sollten, ist sicher von einer stark wachsenden Bedeutung des Batterierecyclingmarktes in Deutschland auszugehen. So wird in einer neuen Studie hierzu betont, dass dem Aufbau der Gigafactories zur Produktion von Lithium-Ionen-Zellen in Europa ein entsprechender Aufbau von Recyclingkapazitäten im Gigawattstunden-Maßstab folgen muss (Fraunhofer ISI 2021). Inzwischen zeichnet sich auch für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien die Wachstumsentwicklung in entsprechenden Investitionsentscheidungen ab. Erkennbar ist dies an Aktivitäten zusätzlicher Unternehmen, die den bisherigen eher überschaubaren Kreis an Recyclingunternehmen von Lithium-Ionen-Batterien in naher Zukunft erweitern werden. So startet das Joint Venture Primobius⁴ noch 2021 mit einer Pilotanlage zu Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Auch Volkswagen hat bereits Anfang 2021 eine Recycling-Pilotanlage eröffnet (Niggelhoff 2021). Ein weiteres prominentes Beispiel ist die BASF, die in Brandenburg eine Prototypanlage bauen will, welche mit optimierten Verfahren Schlüsselrohstoffe wie Lithium, Kobalt, Nickel und Mangan aus ausgedienten Lithium-Ionen-Batterien gewinnen wird. Die Anlage soll Anfang 2023 in Betrieb gehen (EUWID 2021).

⁴ Primobius wurde gemeinsam gegründet von der in Düsseldorf ansässigen SMS Group und der australischen Firma Neometals.

4. Heutige Bedeutung Batterieproduktion und -recycling

4.1. Volkswirtschaftliche Bedeutung in der Literatur

Im Folgenden werden die Erkenntnisse der Literaturrecherche zu aktuellen betriebs- und volkswirtschaftlichen Kennzahlen der Batterie- und Elektromotorfertigung sowie des Batterierecyclings in Deutschland dargelegt. In diesem Kapitel werden die aktuellen Angaben und Kennzahlen zu den sechs relevanten Faktoren Vorleistungsstruktur, Wertschöpfung, Marktvolumen, Produktionskosten, Arbeitsintensität sowie Beschäftigung aufgeführt. Die Kennzahlen sind auch in einer Übersichtstabelle (Tabelle 9) im Anhang A1 zu finden.

Das Kapitel 4.1 unterteilt sich nach den sechs genannten Faktoren, wobei für jeden Faktor jeweils ein Absatz zu den Themen Batterieproduktion, Batterierecycling und Fertigung von Elektromotoren folgt. Wie im letzten Kapitel dargelegt, setzt sich die Batteriewertschöpfungskette aus der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung, der Herstellung von Precursoren, der finalen Herstellung von Elektroden, der Zellfertigung, der Batteriefertigung sowie der Wiederverwendung/Recycling zusammen.

Vorleistungsstruktur

Als relevanteste Vorleistungen der **Batteriezellenproduktion** dienen Primär- und Sekundärrohstoffe. Insbesondere die Rohstoffe Lithium, Kobalt, Nickel, Mangan und Graphit sind von großer Bedeutung (Fraunhofer ISI 2020). Batteriezellen werden in Montagewerken zu Zellmodulen zusammengefügt. Die Module werden schließlich miteinander kombiniert und bilden ein vollständiges Batteriepack, welches im Unterboden des BEV verbaut wird. Das Batteriepack bildet ein komplexes Ensemble aus der Batteriehardware, Chemie, Elektronik und Software (Harrison und Ludwig 2021). Neben der Rohstoffindustrie liefern folglich auch die Chemie- und Elektronik- aber auch die Logistikbranche wichtige Vorleistungen der Batterieproduktion.

Das **Batterierecycling** benötigt als primäre Vorleistung Batteriepacks oder aber einzelne Batteriemodule. Fahrzeugbatterien werden in aller Regel nach 8-10 Jahren, zwingend aber nach einem Absinken der Kapazität auf weniger als 70% des ursprünglichen Niveaus ausgetauscht (Harrison und Ludwig 2021). Diese ehemaligen Fahrzeugbatterien werden entweder als Stromspeicher wiederverwendet (Second-Life-Einsatz) bis sie eine Restkapazität von 30% erreicht haben und anschließend recycelt (ADAC 2019) oder direkt nach der First life Nutzung dem Recyclingprozess zugeführt. Die Recyclingbranche ist hierbei auf Logistikdienstleistungen angewiesen, welche das Sammeln und Ausliefern der zu recycelnden Batterien leisten. In den Recyclinganlagen werden die Batteriemodule zunächst durch eine Zerkleinerungsanlage geführt. Im weiteren Verlauf des Recyclingprozesses werden oftmals chemische oder elektrochemische Trennungsmethoden angewandt, um die einzelnen Rohstoffe aus den zerkleinerten Batteriemodulen zu lösen (Piątek et al. 2021). Alternativ kann eine thermische Aufschmelzung

zum Einsatz kommen, um Rohstoffe (mit gewissem Verlust einzelner hitzeempfindlicher Rohstoffe) zurückzugewinnen (ADAC 2019). Somit sind die Energie- und Chemiebranche wichtige Vorleistungslieferanten des Batterierecyclings. Zwar gibt es neue Verfahrenstechniken, bspw. aus der Schweiz, welche in Pilotanlagen ganz ohne den Einsatz chemischer Substanzen sowie thermischer Aufschmelzung und mit vergleichsweise wenig strombasierter Energie funktionieren (Bürigi 2021), allerdings werden in dem beteiligten Unternehmen vorwiegend kleine Batteriemodule für elektrische Posträder produziert und recycelt. Ob ein analoges Recyclingverfahren auch für 400-Kilogramm-Batteriemodule umsetzbar sein wird, ist sehr unsicher. Es ist daher nicht davon auszugehen, dass die Recyclingbranche in Zukunft ohne chemische Vorleistungen auskommen wird.

Für die Elektromotorherstellung relevant sind insbesondere die Vorleistungen Rohstoffe, strombasierte Energie und Logistik. Zu den wichtigsten Rohstoffen zählen hierbei Stahl, Kupfer und Aluminium. Die Tatsache, dass der Antriebsstrang eines Elektrofahrzeugs (BEV) aus wenigen Hundert Bauteilen und der konventionelle Antriebsstrang eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor (ICEV) aus bis zu 1400 Bauteilen besteht, lässt eine massive Verschiebung und Umbrüche in Folge des Transformationsprozesses in der Vorleistungsstruktur voraussagen. Insbesondere die Vorleistung Metallverarbeitung verzeichnet im Zuge dessen einen starken Rückgang der zu liefernden Vorleistungsvolumen (Spath et al. 2012).

Wertschöpfung

Die **Batterieproduktion** nimmt nach aktuellen Berechnungen bis zu 40% der gesamten Wertschöpfung der E-Fahrzeugproduktion ein (Bloomberg 2021; Wietschel et al. 2017). Damit stammt bei der Produktion eines BEV die höchste Wertschöpfung aus der Batterieproduktion. Die Wertschöpfungsveränderung durch den Einbau eines Batteriepacks betrug im Jahr 2014 im Vergleich zu einem ICEV +10.800 Euro pro Fahrzeug. Die gesamte Wertschöpfungsveränderung pro BEV im Vergleich zu einem ICEV betrug im Jahr 2014 zusammen mit dem Wertschöpfungsverlust wegfallender Komponenten und dem Wertschöpfungszugewinn durch den Einbau weiterer BEV-spezifischer Bauteile rund 10.650 Euro (RWTH 2014). Untersuchungen der BCG kommen im Jahr 2020 zu dem Ergebnis, dass der Wertschöpfungswert eines BEV im Schnitt 30% über dem eines vergleichbaren ICEV liegt. Dieser Wertschöpfungszuwachs ist hauptsächlich auf den Einsatz der Batterie zurückzuführen (BCG 2020). Die Wertschöpfungskette einer Lithium-Ionen-Batterie setzt sich mit Stand 2014 wie folgt zusammen: 25% der Wertschöpfung ist auf die Rohstoffgewinnung und die Materialvorbereitung zurückzuführen, 40% entfallen auf die Produktion der einzelnen Batteriezellen, 30% auf die Zusammenstellung der Batteriemodule und nur 5% werden der Montage der Batteriepacks zugerechnet (RWTH 2014). Eine weitere

Quelle kommt zum Schluss, dass 60 bis 80% der Wertschöpfung der Batterieproduktion von der Zellproduktion generiert werden (ElektroMobilität NRW 2020).

Die Wertschöpfung des **Recyclings** von Fahrzeugbatterien nimmt nur einen Teil der Wertschöpfung des gesamten Wirtschaftszweig WZ 38.3 Rückgewinnung ein. Über die Höhe des Anteils sind derweil keine belegbaren Aussagen möglich. Die Bruttowertschöpfung des Wirtschaftszweigs Rückgewinnung betrug im Jahr 2019 insgesamt rund 4 Mrd. Euro (DESTATIS 2020).

In einem ICEV entfallen rund 35% der Gesamtwertschöpfung auf die Produktion des Antriebsstrangs mit den Bestandteilen Verbrennungsmotor, Kupplung, Getriebe, Antriebswelle und Achsdifferential (CAR 2021). Dieser Wert beträgt bei BEV aufgrund des vergleichsweisen kompakten Aufbaus des Elektromotors und des Ein-Gang-Getriebes lediglich noch 10% (Bloomberg 2021). Die Wertschöpfungskette des Elektromotors setzt sich zu 34% aus der Produktion der Welle, des Gehäuses und des Blechpakets zusammen, zu 53% aus der Montage des Rotors und Stators sowie zu 13% aus der Endmontage (RWTH 2014). Der Wertschöpfungszuwachs durch den Einbau eines Elektromotors betrug im Jahr 2014 rund 1.300 Euro pro Fahrzeug, welche einem Wertschöpfungsrückgang durch den Wegfall des Verbrennungsmotors von rund 1.500 Euro pro Fahrzeug gegenübersteht (RWTH 2014). Die Nettoveränderung der Wertschöpfung ist somit für die Komponente Motor negativ. Die Wertschöpfung pro Vollzeitäquivalent (VZÄ) fällt bei der Produktion eines elektrischen Antriebsstrangs rund 60% höher aus als bei der Produktion eines Antriebsstrangs für ICEV. Dies ist auf die geringere Anzahl an Komponenten zurückzuführen, welche für den Antriebsstrang eines BEV benötigt werden (Fraunhofer IAO 2018). Die geringeren Arbeitsstunden pro Antriebsstrang führen zu einer höheren Wertschöpfung pro VZÄ und einer substantiellen Wertschöpfungsverschiebung pro VZÄ. Im Jahr 2019 betrug die Bruttowertschöpfung, welche von den direkt vom Verbrennungsmotor abhängigen Beschäftigten generiert wurde, rund 30 Mrd. Euro. Dies entspricht 7.3% der Gesamtwertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes (ifo 2021).

Marktvolumen

In BEV kommt es überwiegend zum Einsatz eines zusammenhängenden **Batteriepacks**, wobei die Größe und Leistung je nach Fahrzeugunterbau variiert. Als zentrale Annahme dieser Betrachtung wird mit einem Batteriepack pro Fahrzeug gerechnet. Die europäische Produktionskapazität von LIB betrug im Jahr 2020 nach Auskunft von Bloomberg 37.8 GWh (Bloomberg 2021). Gemäß einer Studie von Harrison und Ludwig betrug die europäische Produktionskapazität im Jahr 2020 hingegen bereits rund 60 GWh (Harrison und Ludwig 2021). Neben der Anzahl an Produktionsstätten und Herstellern von Batterien nahm auch die durchschnittliche Kapazität der Produktionsstätten in den letzten Jahren stark zu: Nach 2.5 GWh im Jahr 2016 betrug die

durchschnittliche jährliche Produktionskapazität im Jahr 2019 bereits 7 GWh (McKinsey 2022). Mit Stand 2020 sind 44% der weltweit verfügbaren Produktionskapazitäten von Batteriezellen im Besitz chinesischer Unternehmen. Betrachtet man den Einfluss aller asiatischen Unternehmen, so umfasst dieser sogar 93% der weltweiten Produktionskapazitäten ein. Während 74% der Produktionskapazitäten in Asien stationiert sind, befinden sich nur 13% der weltweiten Produktionskapazitäten auf europäischem Boden. Die globale Nachfrage nach LIB übersteigt die bisherige und angekündigte europäische Produktionskapazität. So betrug die weltweite Nachfrage nach LIB für den Fahrzeugbau im Jahr 2020 rund 120 GWh (CEA 2021). Die deutsche Batterieindustrie erzielte im Jahr 2020 einen Gesamtumsatz von 5.9 Mrd. Euro. Im Vergleich zum Jahr 2019 wuchs der deutsche Batteriemarkt um 35% oder um 1.5 Mrd. Euro Umsatz. Im Jahr 2020 betrug der Umsatz mit Lithium-Ionen-Batterien über 3 Mrd. Euro und somit mehr als die Hälfte des Gesamtumsatzes der deutschen Batteriebranche. Zwischen 2019 und 2020 wuchs das Segment der LIB in Deutschland um über 60% (ZVEI 2021).

Der Wirtschaftszweig WZ 38.3 Rückgewinnung erzielte im Jahr 2019 einen Gesamtumsatz von rund 17 Mrd. Euro (DESTATIS 2020). Darunter fällt auch der Umsatz des **Batterierecyclings**, dessen Anteil am Gesamtumsatz des Wirtschaftszweigs allerdings klein ausfällt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Batterierecycling von Lithium-Ionen-Batteriepacks einen im Vergleich zu anderen Wirtschaftsbereichen vergleichsweise neuen Industriezweig darstellt und Fahrzeugbatterien bisher vorwiegend im asiatischen Ausland recycelt wurden (Harrison und Ludwig 2021). Die deutschen Recyclingkapazitäten für Lithium-Ionen-Batterien sind folglich zum jetzigen Zeitpunkt sehr gering (NPM 2021).

Die deutschen Elektromotorhersteller können eine starke internationale Wettbewerbsposition vorweisen. Dies ist auf einen überproportional hohen Anteil transnationaler Patente und langjähriger Erfahrung – vor allem in der Produktion von Mehrphasen-Wechselstrommotoren – zurückzuführen. Deutschland zählt aus diesen Gründen zu den bedeutendsten Exporteuren von Elektromotoren (Plötz und Eichmann 2011). Im Jahr 2020 betrug der Umsatz des Wirtschaftszweigs WZ 27.11 Herstellung von Elektromotoren, Generatoren und Transformatoren rund 14 Mrd. Euro (DESTATIS 2021). Im ersten Halbjahr 2021 wurden weltweit mehr als 5 Mio. elektrische Antriebsmotoren mit einer Gesamtleistung von 475 GW in Hybrid-, Plug-in-Hybrid und vollelektrischen Fahrzeugen auf die Straße gebracht (Adamas Intelligence 2021).

Produktionskosten

Beim Vergleich der Produktionskosten und Preise von Batterien gilt es, auf die Differenzierung in **Batteriezellen und Batteriepakete** zu achten. So belaufen sich die Kosten eines Lithium-Ionen-Batteriepacks im Jahr 2020 auf 120 Euro/kWh. Auf Zellebene betragen die Kosten im Jahr 2020 rund 90 Euro/kWh (Bloomberg 2021). Für ein durchschnittliches Elektrofahrzeug – wie

etwa dem VW ID.3 mit einem Energiegehalt der Fahrzeugbatterie von rund 60 kWh – führt dies im Jahr 2020 zu Batteriekosten auf Packebene von rund 7.200 Euro und auf Zellebene von rund 5.400 Euro pro Fahrzeug (Annahme INFRAS/Öko-Institut). Die Batteriezellkosten setzen sich hauptsächlich aus standortunabhängigen Kosten zusammen, welche bis zu 80% der Kosten einnehmen. Dazu gehören insbesondere Material- und Anlagenkosten. Lohnkosten machen mit bis zu 10% der Kosten aus. Aufgrund des hohen und voraussichtlich weiter steigenden Anteils der Materialkosten an den Gesamtkosten ist ein gesicherter Zugriff auf kostengünstige Primärrohstoffe und Batteriekomponenten wettbewerbsentscheidend (Fraunhofer ISI 2020). Im Jahr 2020 nahmen die Kosten des Batteriepacks im Durchschnitt 40% der Gesamtkosten eines BEV ein, wobei hierbei auch die Produktionskosten des Elektromotors enthalten sind (König et al. 2021).

Die **Recyclingkosten** einer Lithium-Ionen-Antriebsbatterie werden für das Jahr 2019 vom Öko-Institut auf Basis eigener Berechnungen auf 1.79 Euro pro Kilogramm geschätzt (Eigene Berechnung Öko-Institut auf Basis vertraulicher Informationen diverser Akteure der Verwertungskette). Für eine Recyclinganlage mit einer Kapazität von 6 Tsd. Tonnen pro Jahr betragen die variablen Kosten nach Aussage einer weiteren Studie rund 640 Euro pro Tonne (BOKU et al. 2021; Thies et al. 2018).

In BEV kommt standardmäßig ein Permanentmagnet-Synchronmotor zum Einsatz. Für die Produktion dieser Elektromotoren kann für das Jahr 2017 mit Herstellungskosten von 10 Euro pro kW ausgegangen werden. Der Anteil des Elektromotors an der Kostenstruktur eines BEV betrug im Jahr 2017 rund 10% (Fries et al. 2017). Im Fall des VW ID.3 mit einer durchschnittlichen Motorleistung von 110 kW führt dies zu Produktionskosten des Elektromotors von rund 1.100 Euro im Jahr 2020 (Annahme INFRAS/Öko-Institut).

Beschäftigung

Im Jahr 2020 wurden im Wirtschaftszweig WZ 27.2 Herstellung von Batterien und Akkumulatoren insgesamt rund 12 Tsd. Beschäftigte gezählt (DESTATIS 2021; ZVEI 2021). Ausgehend von einem LIB-Umsatzanteil von rund 50% der gesamten deutschen **Batteriebranche**, lässt sich die Annahme treffen, dass rund 6 Tsd. Beschäftigte in Deutschland der LIB-Produktion zuzuordnen sind. Mit Stand 2016 beträgt der Stellenschlüssel bei der Montage von Batteriepacks auf einer Montagelinie pro 250 Tsd. Stück im Jahr 350 Beschäftigte. Für die Montage von einer Millionen Batteriepacks jährlich auf 4 Montagelinien werden 1.320 Beschäftigte benötigt (Fraunhofer IAO 2018). Dies bezieht sich auf Batteriepacks mit einer Kapazität von 60 kWh und die Produktion der einzelnen Zellen ist hierbei nicht berücksichtigt. Ohne Berücksichtigung von Skaleneffekten beträgt der Beschäftigtenschlüssel in der gesamten Batterieproduktion pro GWh 90 bis 180 direkte Stellen sowie 350 bis 1.400 indirekte Stellen, welche mit der Batterieproduktion

verbunden sind. Durch die Berücksichtigung von Skaleneffekten, welche in Batteriezellen- und Modulproduktionen mit einer Produktionskapazität von bspw. 1000 GWh pro Jahr erzielt werden können, ergibt sich ein Beschäftigtenschlüssel von 40 direkten Stellen pro GWh (EIT 2021). Für Produktionen mit wenigen GWh Produktionskapazität pro Jahr ergeben sich maximal 90 direkte und bis zu 400 indirekte Arbeitsplätze pro GWh (Fraunhofer ISI 2020). Diese Werte decken sich mit den Zahlen der EIT Studie (2021). Bei der isolierten Betrachtung der Produktion auf Zellebene wird ersichtlich, dass die Zellproduktion den arbeitsintensivsten Teil der Batterieproduktion einnimmt. So werden ohne Berücksichtigung der Skaleneffekte 50 Beschäftigte pro GWh benötigt, während die Zahl unter Berücksichtigung von Skaleneffekten auf 30 sinken kann (EIT 2021). In Großproduktionsstätten von Batterien machen die Beschäftigten der Zellproduktion somit drei Viertel der Gesamtbeschäftigten aus. Insgesamt lässt sich annehmen, dass die Anzahl Beschäftigter in der gesamten und mehrstufigen Wertschöpfungskette, d.h. der Ressourcengewinnung, Batterieproduktion auf Zellen- und Modulebene, Batteriepackfertigung, der Herstellung von Endprodukten wie Elektrofahrzeuge oder stationäre Anwendungen sowie dem Recycling, bis zu 5-10 mal höher sind als die Anzahl Beschäftigter, welche direkt oder indirekt ausschließlich mit der Batterieproduktion verbunden sind (EIT 2021).

Der Wirtschaftszweig WZ 38.3 Rückgewinnung zählte im Jahr 2019 deutschlandweit rund 44 Tsd. Beschäftigte (DESTATIS 2020). Davon entfällt jedoch nur ein Bruchteil auf den Tätigkeitsbereich des Recyclings von Fahrzeugbatterien. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das **Batterierecycling** von Lithium-Ionen-Batteriepacks einen im Vergleich zu anderen Wirtschaftsbereichen vergleichsweise neuen Industriezweig darstellt und Fahrzeugbatterien bisher vorwiegend im asiatischen Ausland recycelt wurden (Harrison und Ludwig 2021).

Im Jahr 2019 zählte die deutsche Automobilindustrie rund 847.600 direkt Beschäftigte (ifo 2021). Hinzu kommen rund 643.000 Beschäftigte im sekundären Markt (bspw. für Ersatzteile und im Handel) sowie rund 654.000 Beschäftigten bei Zulieferern anderer Branchen und im Dienstleistungsbereich. Insgesamt beschäftigt die Automobilwirtschaft somit rund 2,2 Millionen Menschen und stellt damit den beschäftigungsstärksten Industriezweig des Landes dar (BMW 2021). In unmittelbarem Zusammenhang mit konventionellen Antrieben standen im Jahr 2019 rund 448 Tsd. direkt Beschäftigte. Somit sind rund sieben Prozent aller Beschäftigten des Verarbeitenden Gewerbes abhängig von konventionellen Antriebsträngen. Indirekt abhängig von konventionellen Antrieben sind mit Stand 2019 rund 167 Tsd. Beschäftigte oder 2.6% der Beschäftigten des Verarbeitenden Gewerbes. Die mit Abstand höchste Abhängigkeit von konventionellen Antrieben besteht in der Automobilindustrie. Die Abhängigkeit betrifft dort 49.8% oder 422 Tsd. der direkt Beschäftigten sowie 5.9% oder 50 Tsd. der indirekt Beschäftigten. Die deutsche Automobilindustrie ist folglich mit rund 472 Tsd. direkt und indirekt abhängigen Beschäftigten besonders exponiert gegenüber der Transformation vom Verbrennungs- hin

zum Elektromotor (ifo 2021). Beim Einbau des Elektromotors entfallen bei der Produktion von BEV rund 22% der Arbeitsstellen im Vergleich zur Produktion von ICEV mit konventionellem Antriebsstrang (Fraunhofer IAO 2018). Im Jahr 2020 waren rund 59 Tsd. Beschäftigte im Wirtschaftszweig WZ 27.11 Herstellung von Elektromotoren, Generatoren und Transformatoren beschäftigt (DESTATIS 2021). Neben diesem direkt betroffenen Wirtschaftszweig sind auch weitere Wirtschaftsbereiche direkt oder indirekt von der Transformation weg vom Verbrennungsmotor hin zum Elektromotor betroffen. So sind im Jahr 2019 rund 23 Tsd. oder 2.1% der Beschäftigten im Maschinenbau (WZ 28) direkt von der Fertigung konventioneller Antriebstränge abhängig. In der Metallerzeugung und -bearbeitung (WZ 24) sind rund 32 Tsd. oder 10% der Beschäftigten indirekt von konventionellen Antrieben abhängig. In der Herstellung von Metallerzeugnissen (WZ 25) sind es mit 12.5% rund 70 Tsd. der Beschäftigten (ifo 2021).

Arbeitsintensität

Der gesamte Arbeitsstundenaufwand der Produktion eines BEV ist in Teilen höher und in Teilen niedriger als jener für die Produktion eines vergleichbaren ICEV. Dies ist damit zu begründen, dass vereinzelte Arbeitsschritte der Produktion vereinfacht werden, während andere Arbeitsschritte arbeitsintensiver ausfallen. So erfordert die **Komponentenherstellung** rund 7% weniger Arbeitsstunden pro BEV im Vergleich zum ICEV, da Abgas- und Kraftstoffsysteme entfallen und oft Ein-Gang-Getriebe zum Einsatz kommen, welche aus vergleichsweise wenigen Bauteilen bestehen. Der Einsatz von Ein-Gang-Getrieben reduziert den Arbeitsaufwand für den Zusammenbau und die Installation des Getriebes um mehr als 50 % im Vergleich zum Arbeitsaufwand für Mehr-Gang-Getriebe in ICEV. Der Bau eines Elektromotors beansprucht folglich nur 2% der Gesamtarbeitsstunden pro BEV, während der Bau eines Verbrennungsmotors rund 7% der Gesamtarbeitsstunden pro ICEV einnimmt. Die **Batterieherstellung** umfasst die Zellproduktion sowie die Montage von Batteriemodulen und -paketen. Hierbei führt allein die Zellfertigung zu einem 8% höheren Arbeitsstundenaufwand bei BEV – basierend auf einem ICEV-Gesamtarbeitsanteil von 100%. Der zusätzliche Arbeitsaufwand bei der **Endmontage** eines BEV, einschließlich des Einbaus der Ladestation und zusätzlicher Verkabelung sowie des Ladens und Ausrichtens der Batterie, überkompensiert die entfallenden Arbeitsschritte der ICEV-Endmontage, wie z.B. der Einbau von Kraftstofftanks, Schaltkabeln und Motorverkabelung. So ist ein Anstieg der Arbeitsstunden in der Fahrzeugendmontage von bis zu 8 % für BEV im Vergleich zum ICEV zu erwarten, wobei ein ähnlicher Automatisierungsgrad angenommen wird (BCG 2020).

Eine Betrachtung der gesamten Fahrzeugproduktion unter Berücksichtigung aller Einzeleffekte kommt zu dem Ergebnis, dass der Arbeitsstundenaufwand pro Fahrzeug für BEV um rund 1% geringer ist als der für ICEV (BCG 2020). Für den Fall, dass sich Automobilhersteller für eine

partielle Auslagerung einzelner Arbeitsschritte entscheiden, sinkt die Arbeitsstundenaufwand pro BEV nochmals. So kann eine Kombination aus einer Auslagerung der Batteriezellen- und Leistungselektronikproduktion zusammen mit einem Verbleib der Batteriemodul- und Batteriepackmontage und dem Elektromotorbau innerhalb des Automobilherstellers zu einer Reduzierung der Arbeitsstunden pro BEV um 4% führen (BCG 2020). Es ist somit allgemein davon auszugehen, dass der Bedarf an Arbeitsstunden pro Fahrzeug langfristig sinken wird, sollte die Automobilindustrie auf eine reine BEV-Produktion zusteuern.

4.2. Volkswirtschaftliche Bedeutung 2020

Bisher spielte die Produktion von Batterien für elektrische Fahrzeuge und das End-of-Life Recycling von Batteriemodulen in Deutschland eine untergeordnete Rolle. Ab dem Jahr 2022 soll die Produktion von Batteriezellen in Deutschland durch die Inbetriebnahme mehrerer Großfabriken stark ausgebaut werden, doch bisher wurden Batteriezellen überwiegend aus dem Ausland importiert und anschließend in Deutschland zu Batteriemodulen zusammengesetzt (Fraunhofer ISI 2021; NZZ 2021). Die qualitative Analyse hat gezeigt, dass die Fertigung und eigentliche Nutzung der Batterie heute (2020) bereits vollständig in Deutschland stattfinden (vgl. Kapitel 3). Wegen dem bisher geringen Anteil an E-Fahrzeugen in Deutschland ist das End-of-Life Recycling noch wenig relevant, findet aber bereits in Deutschland statt. Die restlichen Stufen der Wertschöpfungskette sind heute in Deutschland nicht vorhanden. Die Forschung und Entwicklung werden in der Analyse nicht berücksichtigt. Neben der qualitativen Einschätzung zur Bedeutung heute verwendeten wir folgende Grundlagen für die quantitative Abschätzung:

- Angaben aus der Literaturanalyse (vgl. IPE et al. [2019], Bloomberg [2021], RWTH [2014], Fraunhofer IOA [2018] in Kap. 4.1),
- das geschätzte Mengengerüst zur PKW-Entwicklung in Deutschland basierend auf der Eröffnungsbilanz des BMWK (BMWK 2022) und
- eigene Annahmen.

Die wichtigsten Kennzahlen und Annahmen zur volkswirtschaftlichen Bedeutung der Batterieproduktion und des Batterierecycling 2020 sind in den folgenden Tabellen aufgeführt. Für die gesamthafte volkswirtschaftliche Bedeutung von Batterieproduktion und – recycling resultiert für das Jahr 2020 eine Wertschöpfung von rund 600 Mio. Euro und 3.000 Beschäftigten.

Tabelle 2: Volkswirtschaftliche Bedeutung Batterieproduktion in Deutschland 2020

Kennzahl	Bedeutung
Wertschöpfung (Mio. Euro)	600
Beschäftigte	2.900

Die Annahmen für die Berechnung sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle INFRAS/Öko-Institut.

Tabelle 3: Batterieproduktion - Wichtigste Kennzahlen und Annahmen zur Abschätzung der volkswirtschaftlichen Bedeutung 2020

Kennzahl	Wert	Erläuterung/Quelle
Produzierte Batterien in Deutschland	430.000	Berechnung basierend auf Mengengerüst vom BMWK (2022), Annahme keine Exporte/Importe unverbauter Antriebsbatterien
Kosten pro Batterie	140 EUR/kWh, 8.400 EUR	Eigene Annahme basierend auf Bloomberg (2021): 120 EUR/ kWh, IPE et. al (2019): 155 EUR/kWh
Wertschöpfung pro Batterie*	7.000 EUR	Eigene Annahme basierend auf RWTH (2014): 10.800 EUR
Wertschöpfungstiefe in Deutschland	20%	Eigene Annahme basierend auf qualitativer Bedeutung 2020 und RWTH (2014)
Produzierte Batterien pro Beschäftigte	150	Eigene Berechnung abgeglichen mit Fraunhofer IOA (2018): 285 Beschäftigte für 250.000 Stück/Jahr

*: Totale Wertschöpfung pro Batterie ohne Berücksichtigung der Wertschöpfungstiefe in Deutschland
Basierend auf RWTH (2014) und Expertise vom Öko-Institut nehmen wir an, dass sich die Wertschöpfung einer Batterie wie folgt aufteilt: 30% Rohstoffgewinnung & Materialvorbereitung, 50% Produktion Batteriezellen, 20% Zusammenbau.

Tabelle INFRAS/Öko-Institut.

Tabelle 4: Volkswirtschaftliche Bedeutung Batterierecycling in Deutschland 2020

Kennzahl	Bedeutung
Wertschöpfung (Mio. Euro)	0.8
Beschäftigte	unbedeutend

Annahmen: Anzahl Batterien Recycling: 850, eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis vertraulicher Informationen diverser Akteure der Verwertungskette und Grundlagen IOT WZ38.3 „Rückgewinnung“ (Destatis 2020), Recycling von Produktionschrott und Vorleistungen des Batterierecyclings sind mitberücksichtigt.

Tabelle INFRAS/Öko-Institut.

5. Bedeutung der Batterieproduktion und -recycling 2030/2050

5.1. Zukunftsszenarien in der Literatur

Im folgenden Kapitel wird die zu erwartende zukünftige Entwicklung der Vorleistungsstruktur, Wertschöpfung, Marktvolumen, Produktionskosten und Beschäftigung anhand der vorhandenen Literatur analysiert.

Vorleistungsstruktur

An der Vorleistungsstruktur der **Batterieherstellung** wird sich bis zum Jahr 2030 sowie 2050 nur geringfügig etwas verändern. So ist in davon auszugehen, dass der Rohstoffbedarf zunehmend mehr durch Sekundärrohstoffe gedeckt wird. Bis zum Jahr 2040 könnten für die Batterieproduktion über 40% des Kobaltbedarfs und über 15% des Bedarfs an Nickel und Kupfer aus dem Recycling stammen (Fraunhofer ISI 2021). Der Lithiumbedarf könnte bis zum Jahr 2050 sogar bis zu 30% aus Recyclingrohstoffen gedeckt werden (Fraunhofer ISI 2020). Folglich wird sich die Vorleistungsstruktur dahingehend anpassen, dass die Rohstoffe für die Batterieproduktion als Vorleistung zunehmend weniger vom Wirtschaftszweig 07-09 Erze, Steine und Erden, Sonstige Bergbauerzeugnisse und verstärkt vom Wirtschaftszweig ZW 38.3 Rückgewinnung erbracht werden. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass die Batterieforschung effizientere Batterien zu Tage bringt und sich dadurch die Zusammensetzung der Batterien und der eingesetzten Rohstoffe verändert. An der Vorleistungsstruktur der Branche wird dies voraussichtlich nur geringfügig etwas verändern, da die Vorleistungsträger unverändert bleiben.

Die Vorleistungsstruktur der Produktion von **Elektromotoren** wird für die Zukunft als unverändert angenommen. Die wichtigsten Vorleistungen sind weiterhin Rohstoffe, strombasierte Energie und Logistik. Zu den wichtigsten Rohstoffen zählen weiterhin Stahl, Kupfer und Aluminium, welche bereits heute weitestgehend recycelt werden können (EuRIC 2019). Daher ist mit keinem größeren Wechsel von Primär- hin zu Sekundärrohstoffen (Rezyklaten) und entsprechenden Veränderungen in der Vorleistungsstruktur zu rechnen.

Die Vorleistungsstruktur des **Fahrzeugbatterierecyclings** kann sich aufgrund neuer Recyclingtechniken verändern. So könnte der technische Fortschritt in Zukunft zur Etablierung von Recyclingmethoden führen, welche mit weniger chemischen und thermischen Anwendungen auskommen (Bürgi 2021). Dies würde einen Rückgang der chemischen Vorleistungen sowie der fossilen Energieträger bedeuten.

Wertschöpfung

Mit fortschreitender Durchsetzung der BEV wird sich die Wertschöpfung in der Automobilproduktion zunehmend von den Automobilherstellern zu den Zulieferern (bzw. deren Insourcing bei den Automobilherstellern) verlagern. Die Verlagerung wird hierbei insbesondere in Richtung der Hersteller von Batteriezellen stattfinden, falls sich die Autohersteller gegen eine Eigenproduktion der Batterien entscheiden (BCG 2020).

Durch den Einbau eines **Batteriepacks** beträgt die Wertschöpfungsveränderung im Jahr 2025 noch +4.800 Euro im Vergleich zu einem ICEV mit Verbrennungsmotor. Die Wertschöpfung eines Batteriepacks ist somit im Vergleich zum Jahr 2014 stark gesunken. Aufgrund des zu erwartenden technischen Fortschritts sowie Arbeits- und Prozessproduktivitätssteigerungen ist davon auszugehen, dass die Wertschöpfung pro Batteriepack bis zum Jahr 2050 weiter sinken wird. Aufgrund der hohen prognostizierten Nachfrage nach Batteriezellen und -packs ist trotz technologisch bedingter sinkender Wertschöpfung pro Batterie mit einem starken Zuwachs des Bruttoinlandprodukts durch den Ausbau der Batterieproduktion in Deutschland zu rechnen (McKinsey 2022). Bis zum Jahr 2030 ist davon auszugehen, dass die anteilige Wertschöpfung der Batteriezellenherstellung an der gesamten Batterieherstellung bei rund 40% liegen wird, welches einer Reduktion um bis zu 50% im Vergleich zum Jahr 2020 entspricht (McKinsey 2022; ElektroMobilität NRW 2020).

Für das Jahr 2025 ist durch den Einbau eines **Elektromotors** mit einem Wertschöpfungszuwachs von rund 800 Euro zu rechnen. Aufgrund des Wertschöpfungsdefizits durch den Verzicht eines Verbrennungsmotors von knapp 1.500 Euro ist auf Ebene des Antriebsstrangs folglich ein nochmals höheres Wertschöpfungsdefizit als im Jahr 2014 zu erwarten. Insgesamt beträgt die gesamte Wertschöpfungsveränderung pro BEV im Vergleich zu einem ICEV im Jahr 2025 rund 4.000 Euro (RWTH 2014).

Die Wertschöpfung des **Batterierecyclings** wird aufgrund des Marktzuwachses in den kommenden Jahrzehnten stark zunehmen. Insbesondere ab 2035 ist mit einer signifikanten Zunahme zu recycelnder Fahrzeugbatteriepacks zu rechnen. Zwischen den Jahren 2035 und 2050 wird die Wertschöpfung der Branche folglich stark zunehmen (Annahme Öko-Institut). Konkrete Prognosen bzgl. der Wertschöpfungsentwicklung des (Fahrzeug-)Batterierecyclings liegen in der Literatur nicht vor.

Marktvolumen

Das Marktvolumen von **Batteriepacks** wird mit der zunehmenden Durchdringung von Elektrofahrzeugen, der veränderten Wertschöpfungsstruktur und des großen Anteils der Batterieproduktion an der Gesamtwertschöpfung stark steigen. So wird das europäische Marktvolumen zwischen 2014 und 2025 jährlich um rund 5 Mrd. Euro ansteigen (NPM 2021). Eine Prognose

des Lithium-Ionen-Batteriemarktes sieht für das Jahr 2030 ein globales Umsatzvolumen von 100-500 Mrd. Euro voraus, von denen 10-100 Mrd. Euro Umsatz in Deutschland anfallen könnten (Wietschel et al. 2017). Bis zum Jahr 2025 ist mit einem Anstieg der europäischen LIB-Produktion auf 423,2 GWh/Jahr zu rechnen (Bloomberg 2021). Nach einer Studie von Harrison und Ludwig soll sich die europäische LIB-Produktion im Jahr 2030 sogar auf insgesamt 950 GWh ausgebaut haben. Bis zum Jahr 2030 könnte die europäische Produktion bereits 33% der weltweiten Produktionskapazität abdecken (Harrison und Ludwig 2021). Die mit Stand Februar 2021 angekündigten jährlichen Produktionskapazitäten in Deutschland sollen sich bis zum Jahr 2030 auf 239 GWh pro Jahr belaufen (Köllner 2021). Ausgehend von einer durchschnittlichen Leistung von 50 kWh pro Batteriepack ließen sich im Jahr 2030 mit dieser Produktionskapazität rund 4.8 Mio. BEV mit Batteriepacks aus deutscher Produktion bestücken. Die Nachfrage nach LIB-Batterien für den Fahrzeugbau wird sich im Jahr 2030 weltweit auf rund 2.400 GWh belaufen (CEA 2021). Der europäische Bedarf an LIB wird nach einer Studie des Fraunhofer-Instituts bis 2025 zwischen 100 und 200 GWh betragen (Fraunhofer ISI 2017). Bis zum Jahr 2030 könnte sich dieser nach einer weiteren Studie des Fraunhofer-Instituts bereits auf bis zu einer TWh belaufen. Die europäischen Produktionskapazitäten reichen bis 2025 von 300 bis 400 GWh pro Jahr und bis 2030 von 500 bis 600 GWh pro Jahr (Fraunhofer ISI 2020). Eine Marktanalyse aus dem Jahr 2021 geht für das Jahr 2030 von einer jährlichen europäischen Produktionskapazität zwischen 700 und 950 GWh aus, von denen 25% bis 32% aus deutscher Produktion stammen werden (VDI/VDE-IT 2021). Eine Studie von Agora Verkehrswende kommt auf Basis der (Stand Januar 2021) angekündigten Zellproduktionskapazitäten in Deutschland auf eine jährliche Produktionskapazität von bis zu 181 GWh in 2025 und 277 GWh in 2030 (Agora Verkehrswende 2021). Bereits ein Jahr später weist eine aktualisierte Untersuchung der angekündigten Produktionskapazitäten eine jährliche Produktionsrate von 151 GWh in 2025 und 405 GWh in 2030 aus (Agora Verkehrswende 2022). Eine isolierte Untersuchung der Herstellung von Batteriezellen von McKinsey kommt zu der Prognose, dass der weltweite Markt für Batteriezellen bis zum Jahr 2030 durchschnittlich mehr als 20% wachsen wird. Im Jahr 2030 ist folglich ein weltweites Marktvolumen von 360 bis 410 Mrd. US-Dollar zu erwarten (McKinsey 2022). Da allgemeiner Konsens darüber besteht, dass die Lithium-Ionen-Batterietechnologie erst in den kommenden zwei Dekaden zur vollen Reife entwickelt sein wird, ist insbesondere bis zum Jahr 2040 noch ein erhebliches Entwicklungspotenzial zu erwarten (VDMA 2018). Daher ist für den Zeitraum zwischen 2030 und 2040 von einem Übergang zu einer hocheffizienten Batterieproduktion auszugehen (NPM 2021). Aufgrund der stetigen technischen Verbesserungen und Kostenreduktionen und dem steigenden Wettbewerbsdruck ist zunehmend mit einer Konsolidierung des Batteriemarktes zu rechnen. So ist in Zukunft mit rund 10 bis 15 großen, marktbeherrschenden Batterieherstellern zu rechnen (McKinsey 2022).

Für die Produktion der **Elektromotoren** ist zwischen 2014 und 2025 mit einer Zunahme des Marktvolumens um rund 825 Mio. Euro zu rechnen. Das Marktvolumen der Verbrennungsmotoren wird sich zeitgleich um 1,6 Mrd. Euro reduzieren (RWTH 2014). In der zitierten Studie wird mit einem Elektromotor pro Fahrzeug gerechnet. Auf Basis der Zulassungszahlen des Kraftfahrtbundesamts und Annahmen des Öko-Instituts ergibt sich eine durchschnittliche Anzahl von 1,4 Elektromotoren pro BEV.⁵ Daraus lässt sich die vereinfachte Annahme ziehen, dass der Bedarf an Motoren bei einem BEV im Schnitt um den Faktor 1,4 höher liegt als bei einem ICEV. Konkrete Ankündigungen bzgl. einer Elektromotorenproduktion in Deutschland gibt es von mehreren deutschen Autobauern. So lässt der Volkswagen-Konzern im VW-Werk Kassel bis zum Jahr 2023 die Endmontage von bis zu 800.000 Elektromotoren pro Jahr aufbauen (HNA 2019). Daimler wiederum wird im Werk Untertürkheim ab 2024 Teile des elektrischen Antriebsstrangs (darunter Elektromotoren) selbst produzieren (Jordan 2019). BMW schließlich wird in seinem Werk in Dingolfing bereits ab 2022 Elektromotoren in Stückzahlen von über einer halben Million pro Jahr produzieren (Donath 2020). Die Beispiele zeigen deutlich, dass neben der zentralen Wertschöpfungskette für Lithium-Ionen-Batterien auch wesentliche Anteile der Wertschöpfungskette für Elektromotoren in Deutschland – und augenfällig in hohem Maße von den OEMs selbst – produziert werden.

Dem europäischen **Batterierecycling** wird bis zum Jahr 2040 voraussichtlich eine Rückführungsmenge von bis zu zwei Tsd. Kilotonnen Altbatterien zugeführt. Bis zum Jahr 2030 werden vorwiegend Altbatterien aus dem Unterhaltungsbereich zu erwarten sein, vor 2035 zunehmend auch Produktionsreste aus der Batterieproduktion. Erst ab dem Jahr 2035 werden alte Fahrzeugbatterien den Großteil der Rücklaufmenge ausmachen und immer stärker ins Gewicht fallen (NPM 2021). Aus einem standardmäßigen Fahrzeugbatteriepack lassen sich bereits heute Rezyklate im Wert von 600 bis 1.300 Euro zurückgewinnen (Fraunhofer ISI 2021). Das Wertpotenzial der in europäischen Anlagen zurückgewonnenen Rezyklate beläuft sich ab dem Jahr 2040 auf rund 5 Mrd. Euro, basierend auf den mittleren Rohstoffpreisen für 2020 (NPM 2021). Der deutsche Anteil an der europäischen Recyclingkapazität beträgt bis zum Jahr 2030 rund 34%. Konkret beträgt das deutsche Recyclingvolumen für Batterien im Jahr 2030 zwischen 19 und 78 Kilotonnen, wobei davon 4 bis 26 Kilotonnen aus Fahrzeugbatterien stammen, während sich der Rest aus Haushaltsbatterien, Batterien weiterer E-Verkehrsmittel sowie Resten aus der Batterieproduktion herleitet. Für das Jahr 2050 beläuft sich das deutsche Recyclingvolumen bereits auf 51 bis 543 Kilotonnen, von denen 30 bis 430 Kilotonnen aus Fahrzeugbatterien

⁵ E-Kleinwagen und E-Kompaktwagen haben i.d.R. nur einen Motor an der Hinterachse verbaut, während E-SUV und E-Premiumklassewagen i.d.R. zwei (Hinter- und Vorderachse), E-Sportwagen teils drei Elektromotoren verbaut haben. Mithilfe der Neuzulassungszahlen der Jahre 2018 bis 2020 (KBA 2021) und der Annahme einer gleichbleibenden Verteilung der Fahrzeugklassen bei Elektrofahrzeugen ergibt sich ein Durchschnitt von 1.4 Elektromotoren pro BEV.

bestehen. Die Spannweite der Werte ergeben sich aus den Min- und Max-Szenarien der zitierten Studie (NPM 2021).

Es ist insgesamt davon auszugehen, dass sich die Jahre zwischen 2020 und 2030 für die Batterieproduktion und die Fertigung von Elektromotoren besonders relevant und dynamisch entwickeln werden. Aufgrund der zeitlichen Verzögerung, innerhalb derer Fahrzeugbatterien ihr Lebensende erreichen, wird der Bedarf nach Recycling von Fahrzeugbatterien voraussichtlich erst ab 2035 stark zunehmen.

Produktionskosten

Bis zum Jahr 2030 werden die Kosten eines **Batteriepacks** auf 51 Euro/kWh sinken. Auf Zellebene wird sich der Preispfad von 90 Euro/kWh im Jahr 2020 auf voraussichtlich 54 Euro/kWh im Jahr 2025 absenken (Bloomberg 2021). Für einen VW ID.3 mit einem Energiegehalt der Fahrzeugbatterie von rund 60 kWh führt dies im Jahr 2030 zu Batteriekosten auf Packebene von rund 3000 Euro und im Jahr 2025 auf Zellebene von rund 3200 Euro pro Fahrzeug (Annahme INFRAS). Die Batteriekosten werden zukünftig einen abnehmenden Anteil der Gesamtkosten eines BEV einnehmen. So wird der Anteil an der Kostenstruktur eines BEV von 40% in 2020 auf 25% in 2030 sinken, wobei hierbei auch die Produktionskosten des Elektromotors enthalten sind (König et al. 2021).

Bezüglich der Produktionskosten eines **Elektromotors** ist für das Jahr 2030 nach Fries et al. weiterhin von einem Kostenniveau von 10 Euro pro kW auszugehen (Fries et al. 2017). Aufgrund des technischen Fortschritts sowie Skaleneffekten ist jedoch damit zu rechnen, dass die Herstellungskosten bis 2030 leicht abnehmen werden. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Studie als Annahme für 2030 ein Kostenniveau von 8 Euro pro kW gewählt. Im Fall des VW ID.3 mit einer durchschnittlichen Motorleistung von 110 kW führt dies zu Produktionskosten des Elektromotors von nunmehr rund 900 Euro im Jahr 2030 (Annahme INFRAS).

Nach Berechnungen des Öko-Instituts werden die Kosten des **Recyclings von Batteriepacks** bis zum Jahr 2050 kontinuierlich sinken. Ausgehend von 1,79 Euro pro Kilogramm wird das Kostenniveau auf 0,89 Euro im Jahr 2030 und schließlich 0,65 Euro pro Kilogramm im Jahr 2050 sinken (Eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis vertraulicher Informationen diverser Akteure der Wertungskette).

Beschäftigung

Die deutsche Automobilindustrie wird in den kommenden Jahren durch den Umstieg auf Elektromobilität einen tiefgreifenden Transformationsprozess durchlaufen. Neben einer

Neuordnung der Wertschöpfungsstruktur kommt es zu einer Verschiebung des Arbeitskraftbedarfs in der gesamten Automobilindustrie (VDI/VDE-IT 2021).

Eine Studie von Wietschel et al. aus dem Jahr 2017 bedient sich einer Bottom-up Analyse, um die Beschäftigungseffekte in der **Batteriebranche** bis 2030 zu prognostizieren. Es wird hierbei mit 1.300 Beschäftigten pro Produktionskapazität von 13 GWh gerechnet. Der Ansatz führt zu einem Potenzial von 10-20 Tsd. direkt Beschäftigten in der Batterieproduktion in Deutschland bis zum Jahr 2030. Hinzu kommen 30-60 Tsd. indirekt Beschäftigte. Die Studie wendet zudem eine Top-down Analyse an, welcher ein Beschäftigtenschlüssel von 1-5 Beschäftigten je 1 Mio. Euro Produktionswert zugrunde liegt. Dieser Ansatz führt zu dem Ergebnis, dass bis zum Jahr 2030 in der deutschen Batterieproduktion 10-100 Tsd. direkt Beschäftigte zu erwarten sind, während die Zahl indirekt Beschäftigter 50-100 Tsd. beträgt (Wietschel et al. 2017). Gemäß einer neuen Veröffentlichung von McKinsey ist durch den Bau einer Batterieproduktionsstätte mit einer jährlichen Kapazität von 30 bis 40 GWh mit der Schaffung von 3.200 direkten Arbeitsstellen zu rechnen. Bei großen Produktionsstätten kann somit mit einem Beschäftigtenschlüssel von 80 neuen Beschäftigten pro GWh gerechnet werden. Die Anzahl indirekt geschaffener Arbeitsstellen bei Zulieferern, im Bauwesen sowie in der Instandhaltungs- und Dienstleistungsbranche beläuft sich auf nahezu den gleichen Wert (McKinsey 2022). Untersuchungen des Center Automotive Research (CAR) kommen zu dem Ergebnis, dass bis zum Jahr 2025 mindestens 35 Tsd. neue direkte Stellen in der Batterieproduktion in Deutschland geschaffen werden. Diese Schätzung beruht lediglich auf den bis zum Jahr 2020 angekündigten Produktionsstätten, welche bis spätestens 2025 voll einsatzfähig sein werden (CAR 2021). Eine höhere Zahl neu geschaffener Stellen ist bis 2030 durchaus möglich.

Eine Studie des Fraunhofer-Instituts kommt zu dem Ergebnis, dass bis zum Jahr 2030 bei einem Produktionsverhältnis von 20% ICEV und 80% BEV und jährlichen Produktivitätssteigerungen von 2% bei ICEV und 3% bei BEV insgesamt rund 53% der Stellen in der Antriebstrangproduktion im Vergleich zum Jahr 2017 entfallen werden. Bei der Produktion der konventionellen Antriebsstränge ist demnach ein Rückgang der Beschäftigten um 85% zu erwarten, während in der Produktion von **Elektroantrieben** (ausgehend von einer sehr viel niedrigeren Beschäftigtenzahl) mit einem Stellenzuwachs um 450% zu rechnen ist (Fraunhofer IAO 2018). Für den Fall eines vollständigen Umstiegs auf Elektroantriebe geht das Center Automotive Research davon aus, dass bis zu zwei Drittel der Stellen im Bereich Antriebstrang entfallen könnten. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass durch neue Stellen in den Bereichen Elektronik und Batterieproduktion ein Großteil des Stellenabbaus kompensiert werden kann. Folglich kommt es lediglich zu einem Stellenabbau von 1,8% der gesamten Beschäftigten in der deutschen Automobilbranche (CAR 2021).

Eine Studie des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB) prognostiziert einen Stellenabbau in der gesamten Fahrzeugbaubranche von rund 83 Tsd. Stellen bis zum Jahr 2035 (IAB 2018). Hierbei sind Beschäftigungseffekte der Bereiche Elektronik und Batterieproduktion enthalten. Das Fraunhofer-Institut kommt zu dem Ergebnis, dass sich die Beschäftigtenzahl bis zum Jahr 2030 im Vergleich zu 2017 in der Produktion von ICEV um 81% reduzieren wird, während sich der Bedarf an Beschäftigten in der Produktion von BEV um 612% zunehmen wird (Fraunhofer IAO 2018). In absoluten Zahlen übertrifft der Wegfall der Stellen in der Produktion von ICEV den Stellenausbau bei der Produktion von BEV jedoch um ein Vielfaches. Somit wird deutlich, dass ein Ausbau der Batteriezellenproduktion in Deutschland den Stellenabbau bei der Herstellung konventioneller Fahrzeugkomponenten voraussichtlich nicht kompensieren kann. Vielmehr sollte der Aufbau einer Batteriezellenproduktion als ein Türöffner für vorgelagerte Vorleistungsstufen verstanden werden (Fraunhofer ISI 2020).

Im **Batterierecycling** wird europaweit für das Jahr 2040 ein Personalbedarf von bis zu 8 Tsd. Beschäftigten vorhergesagt. Für Deutschland wird im Jahr 2030 ein Bedarf von 130 bis 470 Beschäftigten und im Jahr 2040 ein Bedarf von 300 bis 3.300 Beschäftigten erwartet. Auf Grundlage von Investitionsbedarfseinschätzungen ergibt sich im Batterierecycling ein Personalbedarf von 5 bis 7 Beschäftigten pro Kilotonne jährliche Recyclingkapazität (NPM 2021). Die Wettbewerbsposition deutscher und europäischer Anlagenbauer im Bereich der Recyclingtechnologien ist nach Aussagen des Fraunhofer-Instituts dank langjähriger Erfahrung und Forschung als gut einzuschätzen. Von der deutschen und europäischen Recyclingbranche sind somit auch in Zukunft neue und effiziente Verfahren zu erwarten (Fraunhofer ISI 2021).

5.2. Definition der Szenarien

Verschiedene Investitionspläne lassen erwarten, dass sich die Bedeutung der Batterieproduktion und -recycling in Deutschland in den nächsten Jahren verändern wird. Um besser zu verstehen, wie eine solche Entwicklung aussehen könnte, analysieren wir zwei Zukunftsszenarien. In beiden Szenarien befinden wir uns auf einem **Dekarbonisierungspfad im Verkehr**. Dieser unterstellt eine schnelle Verbreitung der Elektromobilität in Deutschland und unterstellt das Erreichen des Netto-Null-Ziels ab. Die Annahmen für den Dekarbonisierungspfad orientieren sich an der Eröffnungsbilanz (BMWK 2022) und wurden in Absprache mit dem BMUV festgelegt. Wichtigste Kenngrößen für unsere Analyse sind folgende:

- Fahrzeugbestand: 16 Mio. vollelektrische Fahrzeuge bis 2030⁶
- Neuzulassungen: ab 2031 zu 100% vollelektrische Fahrzeuge⁶ (2020: 6,7%)
- BIP-Entwicklung: folgt Projektionsbericht 2021 für Deutschland⁷

⁶ Schätzungen des Öko-Instituts auf Basis BMWK 2022

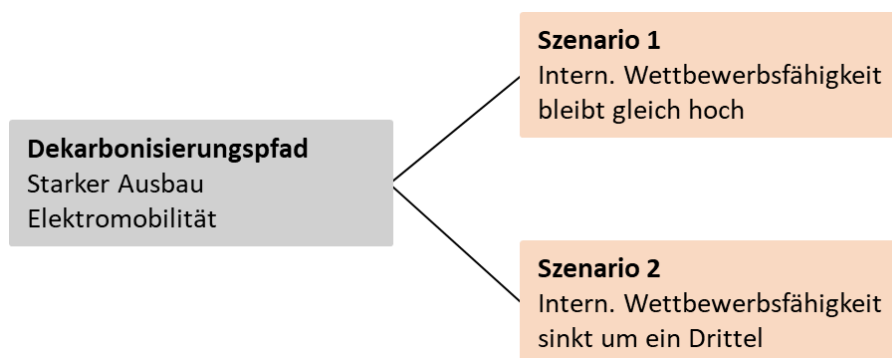
⁷ Öko-Institut et al. 2021

Die zwei Szenarien bauen beide auf dem Dekarbonisierungspfad auf, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der internationalen **Wettbewerbsfähigkeit** der Automobilbranche (vgl. Abbildung unten):

- **Szenario 1, Wettbewerbsfähigkeit bleibt gleich hoch (SZ1):** Das erste Szenario betrachtet den Fall einer gleichbleibend hohen Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Automobilhersteller und -zulieferer. Können die Automobilhersteller und -zulieferer ihre Wettbewerbsfähigkeit halten, gehen wir davon aus, dass Deutschland einen wettbewerbsfähigen Sektor „Batterieproduktion und -recycling“ aufbauen kann und weiterhin relevante Exportaktivitäten aufweisen wird. Dies zieht als Szenarioannahmen nach sich, dass in Deutschland der Anteil der Inlandproduktion an den Neuzulassungen und der Exportanteil des Jahres 2050 den Anteilen des Jahres 2020 entsprechen. Aufgrund der langen Lebensdauer von elektrischen Fahrzeugen sind große Mengen an Altbatterien im Recycling erst mittel- bis langfristig zu erwarten (ab 2035).
- **Szenario 2, Wettbewerbsfähigkeit sinkt (SZ2):** Das zweite Szenario beschreibt eine Zukunft, in der die deutschen Automobilhersteller und -zulieferer ihre hohe internationale Wettbewerbsfähigkeit nicht aufrechterhalten können. Die Standortattraktivität von Deutschland verschlechtert sich. Aufgrund niedrigerer Lohnkosten verschiebt sich die Automobilproduktion von Deutschland zunehmend in andere Länder. Wir gehen deshalb davon aus, dass die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Automobilindustrie insgesamt im Vergleich zu Szenario 1 um ein Drittel tiefer ausfällt.

Für beide Szenarien gehen wir davon aus, dass das Batterierecycling vollständig in Deutschland erfolgt. Lithium-Ionen-Batterien sind ein Gefahrgut, der grenzüberschreitende Transport von gebrauchten und teilweise defekten Altbatterien ist somit sehr kostenintensiv und allein aus Versicherungsgründen unwahrscheinlich (Kampker et al. 2018). Zudem sind die Logistikkosten für den Transport so hoch, dass der Transport in ein anderes Land nicht rentabel ist. Aus diesen Gründen gehen wir davon aus, dass die Entwicklung des Batterierecycling an die Durchdringung der E-Fahrzeuge gekoppelt ist, nicht aber an den Ausbau der Batterieproduktion in Deutschland. Dies zeigt sich auch in Ländern mit heute bereits hohem Anteil an E-Fahrzeugen – z.B. Norwegen. Dort werden bereits heute Investitionsentscheidungen für den Bau von Batterierecycling-Werken gefällt.

Abbildung 4: Mögliche Szenarien zu Batterieproduktion &-recycling in Deutschland für 2030 und 2050



Grafik INFRAS/Öko-Institut.

Die Corona-Pandemie und der Russland-Ukraine-Konflikt haben weltweit Auswirkungen. So prognostiziert z.B. die internationale Energieagentur (IEA), dass die Preise der Batterien wieder steigen könnten, weil die Preise für die Rohstoffe der Batterien gestiegen sind und der Druck durch den Russland-Ukraine-Konflikt weiter zunimmt (Ecomento 2022). Die langfristigen Auswirkungen dieser übergeordneten Entwicklungen sind jedoch ungewiss. Vor diesem Hintergrund verzichten wir darauf, diese für das Jahr 2030 und 2050 zu berücksichtigen.

5.3. Volkswirtschaftliche Bedeutung 2030, 2050

In diesem Kapitel präsentieren wir die Ergebnisse zur erwarteten volkswirtschaftlichen Bedeutung der Batterieproduktion und des Batterierecycling in Deutschland für die Jahre 2030 und 2050 unter den genannten Rahmenbedingungen je für die beiden Szenarien separat. Wir beginnen mit der volkswirtschaftlichen Bedeutung der Batterieproduktion, zeigen danach die Bedeutung des Batterierecycling auf und danach schliessen wir mit der totalen Bedeutung der Batterieproduktion und des Batterierecyclings zusammen.

Für die quantitative Abschätzung 2030/2050 verwenden wir die gleichen Grundlagen wie für die Abschätzung «heutige Bedeutung»:

- qualitative Einordnung der Bedeutung (vgl. Kapitel 3),
- Angaben aus der Literaturanalyse,
- das geschätzte Mengengerüst (BMWK 2022) und
- eigene Expertise.

Batterieproduktion

Im **Szenario 1** kann die deutsche Automobilbranche ihre internationale Wettbewerbsposition halten und schafft in der Produktion den Umstieg auf E-Fahrzeuge. Aufgrund der starken Durchdringung der E-Fahrzeuge steigt die Anzahl der produzierten Batterien und damit auch

die volkswirtschaftliche Bedeutung der inländischen Batterieproduktion stark an. Gleichzeitig profitieren die produzierenden Unternehmen von Effizienzpotentialen, was Umsatz und Wertschöpfung im Anstieg leicht dämpft. Durch den zunehmenden Aufbau von Know-how und Routine in der Produktion, kann die Arbeitsproduktivität weiter gesteigert werden. Es sind somit im Verlauf der Jahrzehnte immer weniger Beschäftigte pro produzierte Batterie notwendig. Im Gegensatz zu heute (2020) findet ein immer größerer Teil der Wertschöpfungskette in Deutschland statt. Ab 2030 wird neben dem Zusammenbau der Batterie, die Produktion der Batteriezellen und die Materialvorbereitung in Deutschland von immer größerer Bedeutung. Die Wertschöpfungstiefe der Produktion in Deutschland steigt somit über die Zeit stetig an. Diese Entwicklungen resultieren in einem starken Anstieg der Wertschöpfung, des Umsatzes und der Beschäftigung der Batterieproduktion von heute (2020) bis 2030 und einem weiteren, abgeschwächten Anstieg bis 2050. Letzteres ist auf die abgeschwächte Durchdringung der E-Fahrzeuge zurückzuführen. Für 2030 schätzen wir eine Wertschöpfung von rund 13,2 Mrd. Euro und 58.200 Beschäftigte in der Batterieproduktion in Deutschland.

Tabelle 5: Batterieproduktion, Szenario 1: Volkswirtschaftliche Bedeutung 2030, 2050

Kenngröße	2030	2050
Wertschöpfung (Mio. Euro)	13.200	18.800
Beschäftigte	58.200	68.000

Dokumentation der Annahmen in Tabelle 6.

Tabelle INFRAS/Öko-Institut.

Tabelle 6: Batterieproduktion - Wichtigste Kennzahlen und Annahmen zur Abschätzung der volkswirtschaftlichen Bedeutung 2030, 2050 (Szenario 1 und Szenario 2).

Kennzahl	Wert 2030	Wert 2050	Erläuterung/Quelle
Produzierte Batterien in Deutschland	4,2 Mio.	5,3 Mio.	Berechnung basierend auf Mengengerüst vom BMWK (2022), Annahme keine Exporte/Importe unverbaubarer Antriebsbatterien
Kosten pro Batterie	7.200 EUR	6.500 EUR	Eigene Annahme basierend auf Bloomberg (2021): 51 EUR/kWh 2030, IPE et. al (2019): 155 EUR/kWh, jährliche Effizienzsteigerung: 1.5% (bis 2030), 0.5% bis 2050
Wertschöpfung pro Batterie*	6.000 EUR	5.300 EUR	Eigene Annahme basierend auf RWTH (2014): 10.800 EUR, jährliche Effizienzsteigerung: 1.5% (bis 2030), 0.5% bis 2050
Wertschöpfungstiefe in Deutschland	50%	65%	Eigene Annahme basierend auf qualitativer Bedeutung heute und RWTH (2014)
Produzierte Batterien pro Beschäftigte	190	250	Eigene Berechnung, Total Beschäftigte abgeglichen mit verschiedenen geplanten Werken und Literatur, z.B. CAR (2021)

*: Totale Wertschöpfung pro Batterie ohne Berücksichtigung der Wertschöpfungstiefe in Deutschland
Basierend auf RWTH (2014) und Expertise vom Öko-Institut nehmen wir an, dass sich die Wertschöpfung einer Batterie wie folgt aufteilt: 30% Rohstoffgewinnung & Materialvorbereitung, 50% Produktion Batteriezellen, 20% Zusammenbau.

Tabelle INFRAS/Öko-Institut.

Im **Szenario 2** verliert Deutschland als Standort für die Automobilindustrie international an Attraktivität, insbesondere aufgrund der hohen Lohnkosten im Vergleich zu anderen Teilen Europas. Dadurch sinken die Exportquote von Personenwagen und der Anteil an im Inland produzierten Neuzulassungen um ein Drittel im Vergleich zu Szenario 1. Die deutsche Automobilindustrie insgesamt verliert an Wettbewerbsfähigkeit. Es wird zwar durch den stetigen Anstieg von E-Fahrzeugen in den kommenden Jahrzehnten eine Batterieproduktion in Deutschland aufgebaut, aber weniger stark als in Szenario 1. Auch im Szenario 2 gehen wir von der gleichen Steigerung der Kosteneffizienz und Arbeitsproduktivität aus wie unter Szenario 2 beschrieben. Dies führt dazu, dass die volkswirtschaftliche Bedeutung der Batterieproduktion wegen der starken Durchdringung der E-Fahrzeuge bis 2030 ansteigt, und danach bis 2050 leicht zurückgeht, weil die deutsche Automobilindustrie ihre internationale Wettbewerbsposition nicht halten kann. 2030 resultiert für die Batterieproduktion eine Wertschöpfung von rund 6.2 Mrd. Euro und 25.9000 Beschäftigte.

Tabelle 7: Batterieproduktion, Szenario 2: Volkswirtschaftliche Bedeutung 2030, 2050

Kenngröße	2030	2050
Wertschöpfung (Mio. Euro)	6.200	5.700
Beschäftigte	25.900	19.700

Dokumentation der Annahmen in Tabelle 6.

Tabelle INFRAS/Öko-Institut.

Batterierecycling

Das Batterierecycling entwickelt sich in Deutschland abhängig von der Durchdringung der E-Fahrzeuge. Aus Sicherheitsgründen und aufgrund der Logistikkosten macht es in beiden Szenarien – unabhängig von der Ausprägung der Batterieproduktion – Sinn, ein Batterierecycling im Inland aufzubauen. Die volkswirtschaftliche Bedeutung des Batterierecycling steigt mit der zunehmenden Bedeutung von E-Fahrzeugen bis 2050 kontinuierlich und unabhängig vom Szenario an. Leicht gedämpft wird diese Entwicklung durch die zunehmende Arbeitsproduktivität und Skaleneffekte. 2030 resultiert für das Batterierecycling eine Wertschöpfung von rund 100 Mio. Euro und 1.000 Beschäftigte.

Tabelle 8: Batterierecycling, Szenario 1&2: Volkswirtschaftliche Bedeutung 2030, 2050

Kenngröße	2030	2050
Wertschöpfung (Mio. Euro)	100	1.000
Beschäftigte	1.000	6.000

Annahmen: Anzahl Batterien Recycling: 190.000 (2030)/3 Mio. (2050), eigene Berechnungen Öko-Institut auf Basis vertraulicher Informationen diverser Akteure der Verwertungskette und Grundlagen IOT WZ38.3 „Rückgewinnung“ (Destatis 2020), Recycling von Produktionsschrott und Vorleistungen des Batterierecyclings sind mitberücksichtigt.

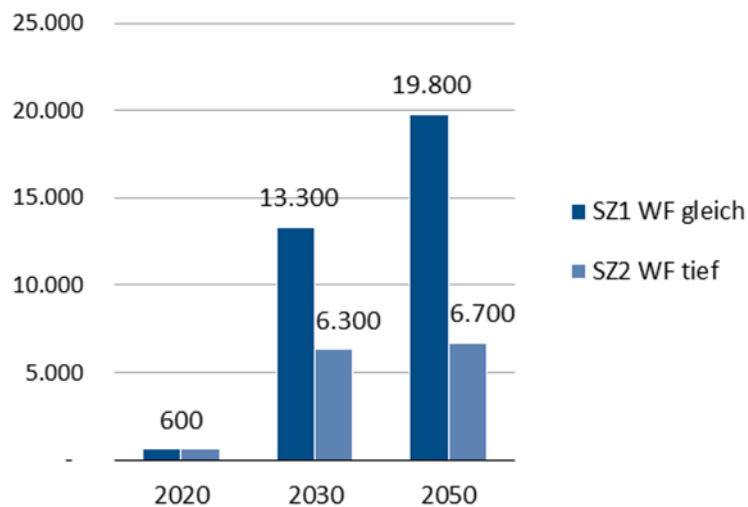
Tabelle INFRAS/Öko-Institut.

Batterieproduktion und Batterierecycling

In den folgenden Abbildungen ist die volkswirtschaftliche Bedeutung der Batterieproduktion und des Batterierecycling in der Summe abgebildet. Die Wertschöpfung und Beschäftigung sind für die beiden Szenarien und die drei Zeitpunkte 2020, 2030 und 2050 dargestellt. Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass die Wertschöpfung und Beschäftigung des Batteriemarktes bis 2030 in beiden Szenarien stark ansteigen. Bis 2050 steigt die volkswirtschaftliche Bedeutung im Szenario 1 weiter an. Der Batteriemarkt zählt rund 74.000 Beschäftigte und generiert jährlich rund 19,8 Mrd. Euro Wertschöpfung, wenn die Automobilebranche ihre Wettbewerbsposition halten kann. Verlieren die Automobilhersteller an internationaler Wettbewerbsfähigkeit (Szenario 2), sinkt die Anzahl Beschäftigte bis 2050 leicht und die Wertschöpfung nimmt absolut leicht zu – dies, weil wir von einer größeren Steigerung der Arbeitsproduktivität ausgehen als

Effizienzpotentiale hinsichtlich der Kosten. Im Szenario 2 zählt der Batteriemarkt 2050 in Deutschland rund 26.000 Beschäftigte und generiert jährlich eine Wertschöpfung von 6,7 Mrd. Euro. Im Anhang A2 befindet sich eine Tabelle mit allen wirtschaftlichen Kennzahlen im Überblick.

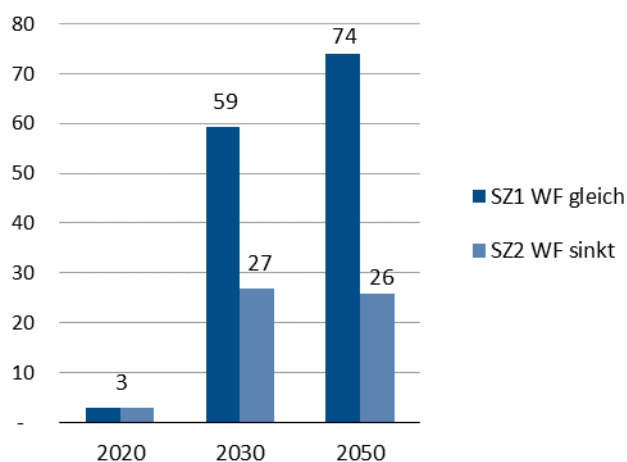
Abbildung 5: Wertschöpfung Batterieproduktion und Batterierecycling (in Mio. Euro)



SZ: Szenario, WF: Internationale Wettbewerbsfähigkeit.

Grafik INFRAS/Öko-Institut.

Abbildung 6: Beschäftigung Batterieproduktion und Batterierecycling (Anzahl Beschäftigte in Tausend)












SZ: Szenario, WF: Internationale Wettbewerbsfähigkeit.

Grafik INFRAS/Öko-Institut.

6. Synthese/Einordnung

Der Verkehr ist für einen wesentlichen Anteil der Treibhausgasemissionen verantwortlich. Die Dekarbonisierung des Verkehrs ist deshalb eine wichtige Säule, damit Deutschland die Klimaschutzziele bis 2030/45 erreichen kann. Der Wandel hin zur Elektromobilität (Antriebswechsel) spielt hierbei eine wichtige Rolle und ist mit einem großen Strukturwandel in der Automobilbranche verbunden. Die Dekarbonisierung des Verkehrs bringt für einige Branchen neue Beschäftigungspotenziale, in anderen hingegen werden künftig weniger Beschäftigte benötigt sein (vgl. Abbildung unten). Letzteres trifft auf die Fertigung fossil betriebener Fahrzeuge, den Handel mit fossiler Energie, die Reparatur und den Handel von Fahrzeugen zu. Im Gegensatz dazu werden die Batterieproduktion und das Batterierecycling, die Produktion und der Handel von E-Fahrzeugen, der Ausbau der Produktion bei den erneuerbaren Energien und beim ÖPNV an Bedeutung gewinnen. Es gibt somit verschiedene Gewinner und Verlierer der Antriebswende. Die folgende Grafik fasst qualitativ zusammen, welche Aspekte für die Beurteilung des volkswirtschaftlichen Nettoeffekts zu berücksichtigen sind. Für das Gesamtbild sind neben den Auswirkungen der Dekarbonisierung, auch die Effekte der Digitalisierung zu berücksichtigen.

Abbildung 7: Beschäftigungswirkung des Antriebswechsels/Dekarbonisierung im Personenverkehr

Potentiale	Rückgang
 Batterieproduktion, -recycling	 Fossil betriebene Fahrzeuge
 E-Fahrzeuge (inkl. Ladeinfrastruktur)	 Fossile Energie
 Erneuerbare Energien	 Reparatur Fahrzeuge
 ÖPNV	 Handel Fahrzeuge
 Weitere Effekte durch die Digitalisierung, z.B. digitale Plattformen, Elektronik Fahrzeuge, Teilen von Fahrten/Fahrzeuge	

Die linke (grüne) Spalte zeigt auf, in welchen Branchen neue Arbeitsplätze entstehen. Die rechte (rote) Spalte führt alle Branchen auf, in welchen Arbeitsplätze verloren gehen.

Grafik INFRAS/Öko-Institut.

Für den Standort Deutschland ist es zentral, dass die deutschen Automobilhersteller im Zuge des Antriebswechsels ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit halten und sich auf den wachsenden Märkten etablieren können, weil der ca. zwei Drittel des Umsatzes der

Fahrzeugproduktion in Deutschland aus dem Export von Fahrzeugen stammt. Im Zuge der Antriebswende wird wertmässig (Wertschöpfung, Umsatz) die Batterieproduktion wichtiger, weil zunehmend E-Fahrzeuge produziert werden und die Batterie bis zu 40% der Wertschöpfung eines Fahrzeuges ausmacht (Bloomberg 2021). In diesem Sinne ist der Ausbau der Batterieproduktion und des Batterierecyclings in Deutschland ein wichtiger Schritt zur Stärkung des Produktionsstandortes im Zuge der Dekarbonisierung.

Die vorliegende Studie untersucht deshalb die heutige volkswirtschaftliche Bedeutung der Batterieproduktion und -recycling in Deutschland und zeigt mögliche Potenziale künftiger Entwicklungsszenarien. Die Studie fokussiert auf Antriebsbatterien für E-Fahrzeuge (Pkw) und auf das Batterierecycling von End-of-Life-Batterien. Es wird die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet (ohne die Forschung). Die Sektoren Batterieproduktion und -recycling sind heute (2020) in Deutschland mit einer Wertschöpfung von 600 Mio. Euro und 3.000 Beschäftigten noch kaum bedeutend. Deutsche Fahrzeugproduzenten bauen heute aus dem Ausland eingekaufte Zellen zu Modulen und Batteriepacks zusammen. Die Gewinnung und Verarbeitung von Primärrohstoffen, die Herstellung von Precursoren und Elektrodenmaterial sowie die Zellfertigung finden noch nicht in Deutschland statt. Lithium-Ionen-Batterien werden bereits seit einigen Jahren in Deutschland recycelt, jedoch noch in sehr geringem Umfang. Mittelfristig dürften sich jedoch insbesondere die Zellfertigung und das Recycling (stärker) im Inland etablieren. Um das künftige Potential aufzuzeigen, haben wir zwei verschiedene Szenarien der Entwicklung der Wettbewerbsfähigkeit der Fahrzeugproduktion in Deutschland für 2030 und 2050 untersucht. In beiden Szenarien analysieren wir einen Dekarbonisierungspfad, welcher sich an der Eröffnungsbilanz des BMWK orientiert und von einer starken Durchdringung der Elektromobilität ausgeht (BMWK 2022).

- Szenario 1: Im ersten Szenario kann die deutsche Automobilindustrie ihre internationale Wettbewerbsposition halten und somit eine relevante Batterieproduktion und ein bedeutendes Batterierecycling aufbauen. Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Batteriebranche steigt dabei stark an (2030: 59.000 Arbeitsplätze, 13,3 Mrd. Euro Wertschöpfung / 2050: 74.000 Arbeitsplätze, 19,8 Mrd. Euro Wertschöpfung).
- Szenario 2: Im zweiten Szenario verliert Deutschland bei der Automobilherstellung an Wettbewerbsfähigkeit. Es wird zwar eine Batterieproduktion in Deutschland aufgebaut, aber in viel kleinerem Ausmaß als in Szenario 1. Das Batterierecycling entwickelt sich vergleichbar wie in Szenario 1, da der Export/Transport von End-of-Life-Batterien ins Ausland nicht rentabel ist (Logistikkosten, Sicherheitsgründe). Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Batteriebranche fällt in diesem Szenario erheblich kleiner aus als in Szenario 1 (2023: 27.000 Arbeitsplätze, 6,7 Mrd. Euro Wertschöpfung / 2050: 26.000 Arbeitsplätze, 6,3 Mrd. Euro Wertschöpfung)

Die Analyse zeigt, dass die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Automobilhersteller ein zentrales Kriterium ist für die künftige Entwicklung der Wertschöpfung und Beschäftigung. Neben der Entwicklung der inländischen Nachfrage ist es deshalb entscheidend, ob sich die deutsche Automobilindustrie künftig auf den internationalen Märkten gleich gut positionieren kann wie bisher. Darauf sollte auch in der Industrie- und Standortpolitik in Deutschland ein Schwerpunkt liegen. Um die Chancen der Dekarbonisierung zu nutzen und Strategien und Maßnahmen dementsprechend zu formulieren, ist deshalb unbedingt eine internationale Sichtweise einzunehmen. Der nationale Fokus ist nicht ausreichend.

Weiter folgt aus der Potenzialabschätzung, dass der Aufbau der Batterieproduktion und des Batterierecyclings eine von mehreren Kompensationsquellen für die wegfallenden Arbeitsplätze in der Automobilherstellung darstellt. Daneben werden aber weitere Branchen – insbesondere die ansteigende Produktion erneuerbarer Energien und die Zunahmen im ÖPNV (durch die Verlagerung vom privaten auf den öffentlichen Verkehr) – an Bedeutung gewinnen und neue Arbeitsplätze in Deutschland schaffen.

Verschiedene Studien bestätigen das Potenzial der Batterieproduktion und -recycling in Deutschland (z.B. Agora Verkehrswende 2021, CAR 2021, VDI/VDE-IT 2021, Köllner 2021, Agora Verkehrswende 2022). ForscherInnen sind sich zudem einig, dass mit der zunehmenden Elektromobilität weniger Beschäftigte in der Fahrzeugherstellung und Komponentenfertigung notwendig sind (z.B. BCG 2020, IPE et al. 2019, Bauer et al. 2018). Einige Studien analysieren den hier nicht vollständig analysierten und in der Abbildung 7 illustrierten Nettoeffekt der technologischen Wende zu Elektromobilität und schließen, dass mit dem Einbezug vor- und nachgelagerter Branchen – insbesondere der Energiewirtschaft – der Beschäftigungseffekt der Antriebswende jedoch insgesamt positiv ausfallen kann (Cambridge Econometrics und elementenergy 2018, Wietschel et al. 2017). Eine Studie der Agora Verkehrswende sagt dem Standort Deutschland (auf Basis der angekündigten Zellproduktionskapazitäten Stand Januar 2021) im Batteriemarkt die Vorreiterrolle in Europa bis 2030 voraus (Agora Verkehrswende 2021). Ein Jahr nach der Agora-Publikation sind die angekündigten Zellproduktionskapazitäten (Stand Mai 2022) für Deutschland bereits um rund 50% von 277 auf 405 GWh gestiegen (Agora Verkehrswende 2022). Dieser Kapazitätssprung zeigt auf, wie dynamisch sich der Markt für Antriebsbatterien entwickelt. So werden in immer kürzeren zeitlichen Abständen weitere Markteintritte neuer oder ausländischer Batteriehersteller sowie weitere Kapazitätsausbauten in Deutschland bekanntgegeben. Daneben kommt es auch vereinzelt vor, dass Produktionsankündigungen wieder zurückgezogen werden – wie der Vergleich der Agora-Zahlen für das Jahr 2025 zeigt: So verringerte sich die angekündigte Produktionsrate in 2025 von ursprünglich 181 auf nunmehr 151 GWh jährlich.

Die vorliegende Analyse zeigt, dass der Aufbau von Batterieproduktion und -recycling in Deutschland eine wichtige Rolle spielt, um dem durch den Strukturwandel bedingten Wegfall von Arbeitsplätzen beim Fahrzeugbau entgegenzuwirken. Es ist im Interesse der öffentlichen Hand, dass die Chancen aus dem laufenden Strukturwandel genutzt und die negativen Effekte v.a. auch auf dem Arbeitsmarkt abgefedert und die positiven gestärkt werden. Zentral ist dabei, dass bei der Ausbildung von jungen Beschäftigten in der Fahrzeugherstellung und im Batteriemarkt die künftig gefragten Skills in der Ausbildung vermittelt und bei erfahreneren Beschäftigten über Weiterbildungen und Umschulungen breit gestreut werden. Dabei kann der Staat unterstützen und sicherstellen, dass die entsprechenden Massnahmen möglichst rasch starten und greifen. Daneben stellt sich für die öffentlich Hand die Frage, ob sie bei der Förderung von gewissen Rohstoffen in Deutschland, welche für die Batterieproduktion benötigt werden, eine aktivere Rolle spielen will.

Die vorliegende Analyse stellt jedoch keine gesamtwirtschaftliche Nettobetrachtung aller Einflusskanäle dar, welche im Zuge der Antriebswende relevant sind. Eine genauere Analyse des Nettoeffekts würde wichtige ergänzende Hinweise liefern für allfällige unternehmerisch und/oder staatlich notwendiger Maßnahmen zur Förderung der gewünschten Entwicklung.

Annex

A1. Literaturrecherche

Die folgende Tabelle führt alle Erkenntnisse aus der Literaturanalyse auf.

Tabelle 9: Volkswirtschaftliche Eckwerte in der Literatur und eigene Annahmen

Batterieproduktion	Fertigung Elektromotor	Batterierecycling
Vorleistungsstruktur		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wichtigste Vorleistungen: Rohstoffe (Lithium, Kobalt), Chemie, Logistik (Annahme Öko-Institut) ▪ Batteriepacks bilden ein komplexes Ensemble aus der Batteriehardware, Chemie, Elektronik und Software (Harrison und Ludwig 2021) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wichtigste Vorleistungen: Rohstoffe (Stahl, Kupfer, Aluminium), Strom, Logistik (Annahme Öko-Institut) ▪ Motor und Getriebe eines ICE bestehen aus rund 1.400 Teilen, Elektromotor und Getriebe eines BEV lediglich aus 200 Teilen (Spath et al. 2012) ▪ Insbesondere Metallverarbeitung verliert stark an Bedeutung als VL (Spath et al. 2012) ▪ Allgemein massive Verschiebungen und Umbrüche in der VL-Struktur (Spath et al. 2012) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wichtigste Vorleistungen: Altfahrzeuge bzw. Altbatterien, Chemie, Strom, fossile Energieträger (Annahme Öko-Institut) ▪ Momentan vorwiegend chemische/elektrochemische und thermische Recyclingmethoden (Piątek et al. 2021) ▪ In Zukunft auch Recyclingmethoden ohne Einsatz von chemischen Substanzen und Verschmelzung möglich (Bürgi 2021)
Wertschöpfung		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bis zu 40% der gesamten Wertschöpfung Fahrzeugproduktion (Bloomberg 2021; Wietschel et al. 2017) ▪ 60-80% der Wertschöpfung der Batterieproduktion entfällt auf Zellproduktion (ElektroMobilität NRW 2020) ▪ Wertschöpfungskette Batterie: 25% Rohstoffgewinnung und Materialvorbereitung, 40% Produktion Batteriezellen, 30% Produktion Batteriemodule, 5% Produktion Batteriepack (RWTH 2014) ▪ Wertschöpfungsveränderung durch Einbau Batterie pro Fahrzeug im Vergleich zum Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (RWTH 2014): 2014: +10.800€ 2025: +4.800€ ▪ Einbau der Batterie führt insgesamt zu einer 30% höheren 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Etwa 10% der gesamten Wertschöpfung Fahrzeugproduktion fallen auf den Antriebsstrang (Motor, 1-Gang-Getriebe) (Bloomberg 2021) ▪ Referenzwert Verbrennungsmotor: 35% der gesamten Wertschöpfung Fahrzeugproduktion entfallen auf den Antriebsstrang (Motor, Kupplung, Getriebe, Antriebswelle und Achsdifferential) (CAR 2021) ▪ Wertschöpfungskette des Elektromotors: 34% Produktion Welle/Gehäuse/Blechpaket, 53% Montage Rotor und Stator, 13% Endmontage (RWTH 2014) ▪ Wertschöpfungsveränderung durch Einbau Elektromotor pro Fahrzeug im Vergleich zum Verbrennungsmotor (RWTH 2014): 2014: +1.280€ 2025: +800€ (steht jeweils einem Wertschöpfungsrückgang des 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bruttowertschöpfung des Wirtschaftszweigs Rückgewinnung (WZ 38.2) betrug im Jahr 2019 rund 4 Mrd. Euro (DESTATIS 2020) → Anteil Batterierecycling gering

Batterieproduktion	Fertigung Elektromotor	Batterierecycling
<p>Gesamtwertschöpfung des BEV im Vergleich zum ICEV (BCG 2020)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wert der Batterie macht größten Anteil des Unterschieds der WS zwischen BEV und ICEV aus (+51% Wert durch Batterie, +6% Wert durch Leistungselektronik im Vergleich zu ICEV) (BCG 2020) ▪ Stellschrauben Szenariobildung: zukünftig 90% der Batterien und 80% der Batteriezellen in DE gefertigt, 5% der benötigten Rohstoffe in DE gewonnen (Annahme Öko-Institut) ▪ Bis 2030 ist eine breite Infrastruktur zur Batteriezellen- und Batterieproduktion aufgebaut (Annahme Öko-Institut) 	<p>Verbrennungsmotors von -1.500€ entgegen)</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 60% mehr Wertschöpfung auf einen Arbeitsplatz in der Herstellung eines elektrischen Antriebsstrangs im Vergleich zum konventionellen Antriebsstrang (Fraunhofer IAO 2018). In einem durchschnittlichen Fahrzeug der Kompaktklasse entfallen rund 30% der Gesamtwertschöpfung des Fahrzeugs auf den Antriebsstrang. Die Wertschöpfungsverschiebungen pro Arbeitsplatz aufgrund des Entfalls des konventionellen Antriebsstrangs sind somit substantiell. ▪ Bruttowertschöpfung der direkt mit dem Verbrennungsmotor abhängigen Beschäftigten betrug im Jahr 2019 rund 30 Mrd. Euro (ifo 2021) 	

Marktvolumen/Umsatz

- 1 Batteriepack pro Fahrzeug (Annahme Öko-Institut)
- Prognose Umsatz 2030 (Wietzel et al. 2017):
global: 100-500 Mrd. €
davon in DE: 10-100 Mrd. €
- Angekündigte Zellproduktionskapazitäten in Deutschland (Agora Verkehrswende 2021), Stand 01/2022:
2025: 181 GWh/Jahr
2030: 277 GWh/Jahr
- Angekündigte Zellproduktionskapazitäten in Deutschland (Agora Verkehrswende 2022), Stand 05/2022:
2025: 151 GWh/Jahr
2030: 405 GWh/Jahr
- Angekündigte Zellproduktionskapazitäten in Deutschland (Köllner 2021), Stand 01/2020:
2025: 231 GWh/Jahr
2030: 239 GWh/Jahr
- Europäische
- Durchschnittlich 1,4 Elektromotoren pro Fahrzeug⁸ (Annahme Öko-Institut)
- Veränderung des Marktvolumens in Europa in 2025 (RWTH 2014):
Elektromotoren: +825 Mio. €
Verbrennungsmotoren: - 1.55 Mrd. €
- Umsatz des Wirtschaftszweigs Herstellung von Elektromotoren, Generatoren und Transformatoren in 2020: rund 14 Mrd. Euro (DESTATIS 2021)
- Umsatz des Wirtschaftszweigs Rückgewinnung im Jahr 2019: rund 17 Mrd. Euro (DESTATIS 2020) → Anteil Batterierecycling geringer
- Kapazitäten des Batterierecyclings in Deutschland momentan sehr gering (NPM 2021)

⁸ E-Kleinwagen und E-Kompaktwagen haben meist nur einen Motor an der Hinterachse verbaut, während E-SUVs und E-Premiumklassenwagen i.d.R. zwei (Hinter- und Vorderachse), E-Sportwagen sogar teils drei Elektromotoren verbaut haben.

Batterieproduktion	Fertigung Elektromotor	Batterierecycling
<p>Produktionskapazität LIB (Bloomberg 2021): 2020: 37,8 GWh 2025: 423,2 GWh</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Globale Nachfrage nach LIB in GWh, nur E-Fahrzeuge (CEA 2021): 2020: 120 GWh 2030: 2.400 GWh ▪ Gesamtumsatz Batteriebranche in DE in 2020: 5.9 Mrd. Euro (ZVEI 2021) ▪ Umsatz Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland in 2020 von über 3 Mrd. Euro, Wachstum um 60% zwischen 2019 und 2020 (ZVEI 2021) 		
Produktionskosten		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prognose Preis Lithium-Ionen-Batterien-Pack pro kWh (Bloomberg 2021): 2020: 120 €/kWh 2024: 81 €/kWh 2030: 51 €/kWh 2035: 39 €/kWh ▪ Preis Batteriezelle (Bloomberg 2021): 2020: 90€ pro kWh 2025: 54€ pro kWh ▪ VW ID.3 als Durchschnittsfahrzeug: Energiegehalt der Fahrzeugbatterie von ca. 60 kWh (ADAC 2021) → auf Zellebene: 2020: 5.400€ 2025: 3.200€ pro Batterie → auf Packebene: 2020: 7.200€ 2030: 3.000€ pro Batterie (Annahme INFRAS) ▪ Anteil Batterie (inkl. Antriebsstrang) an Kostenstruktur BEV (König et al. 2021): 2020: 40% 2030: 25% 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kosten Permanentmagnet-Synchronmotoren (Standardmotor BEV) (Fries et al. 2017): 2020: 10 €/kW 2030: 10 €/kW (Anmerkung INFRAS: Kostensenkung erwartbar, daher Annahme für 2030: 8 €/kW) ▪ VW ID.3 als Durchschnittsfahrzeug: Leistung des Elektromotors von 110 kW (ADAC 2021) → Kosten pro Elektromotor: 2020: 1.100€ 2030: 900€ (Annahme INFRAS) ▪ Kostenanteil des Elektromotors an BEV beträgt rund 10% (Fries et al. 2017) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recyclingkosten LIB im Jahr 2019: 1.79€ pro Kilogramm (Annahme Öko-Institut) ▪ Recyclinganlage mit 6 Tsd. Tonnen Kapazität pro Jahr: variable Kosten von 640€ pro Tonne (BOKU et al. 2021, Thies et al. 2017)
Beschäftigte		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 12 Tsd. Beschäftigte im Wirtschaftszweig WZ 27.2 Herstellung von Batterien und 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 59 Tsd. Beschäftigte im Wirtschaftszweig WZ 27.11 Herstellung von Elektromotoren, Generatoren 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirtschaftszweig WZ 38.3 Rückgewinnung zählte im Jahr 2019 deutschlandweit rund 44 Tsd.

Batterieproduktion	Fertigung Elektromotor	Batterierecycling
<p>Akkumulatoren (DESTATIS 2021; ZVEI 2021)</p> <ul style="list-style-type: none"> Herstellung Traktionsbatterie (ohne Zellen): 285 Beschäftigte für 250.000 Stück/Jahr, 1140 Beschäftigte für 1 Mio. Stück/Jahr in D im Jahr 2016 (Fraunhofer IAO 2018) 8% mehr Arbeitsstunden pro BEV im Vergleich zu ICEV durch Fertigung der Batteriezelle (BCG 2020) Bottom-up Prognose 2030 für DE: Potenzial von 10-20 Tsd. Beschäftigten in Batterieproduktion, Potenzial von 30-60 Tsd. indirekt Beschäftigten (Wietschel et al. 2017) Top-down Prognose 2030 für DE: Potenzial von 10-100 Tsd. Beschäftigten in Batterieproduktion, Potenzial von 50-100 Tsd. indirekt Beschäftigten (Wietschel et al. 2017) Mindestens 35 Tsd. Beschäftigte in Batteriezell- und Modulwerken in DE (CAR 2021) Wenn Batterieherstellungsstufen von OEM durchgeführt werden: 1% weniger Arbeitsstunden für BEV im Vergleich zum ICEV. Wenn OEM Batteriezellen und Leistungselektronik outsourcen: 4% weniger Arbeitsstunden für BEV im Vergleich zum ICEV (BCG 2020) Auf Batteriepackebene: ohne Berücksichtigung von Skaleneffekten 90 bis 180 direkt Beschäftigte pro GWh, unter Berücksichtigung von Skaleneffekten 40 direkt Beschäftigte pro GWh (EIT 2021) Auf Zellebene: ohne Berücksichtigung von Skaleneffekten 50 Beschäftigte pro GWh, unter Berücksichtigung von Skaleneffekten 30 Beschäftigte pro GWh (EIT 2021) 	<p>und Akkumulatoren (DESTATIS 2021)</p> <ul style="list-style-type: none"> 35% der Beschäftigten in der deutschen Autoindustrie werden dem Bereich Antrieb zugeordnet (Stand April 2020: 814.000 gesamt, davon 284.900 Antrieb) (CAR 2021) Zwei Drittel der direkten Arbeitsplätze in der Antriebsstrangproduktion entfallen durch Umstellung auf Elektroantrieb oder 2,8% der Gesamtbeschäftigten (CAR 2021) Zuwachs der Elektrofahrzeuge federt den Arbeitsplatzabbau durch neue Stellen in der Elektronik, Batterieproduktion usw. ab, jedoch fallen trotzdem bis 2030 in DE in der Automobilbranche 1,8% der Stellen weg. Allerdings sind hier voraussichtliche zusätzliche Kapazitäten zur Batteriezellenproduktion noch nicht berücksichtigt, sodass ein negativer Gesamteffekt nicht direkt nachweisbar ist (CAR 2021) => Produktion Antriebsstrang isoliert betrachtet: Stellenabbau um 66% unter der Annahme, dass in 2030 20% ICE und 80% BEV und jährliche Produktivitätssteigerungen von 2% bzw. 3%, wird für die Antriebsstrangproduktion mit einem Abbau der Beschäftigten um 53% im Vergleich zu 2017 gerechnet (Fraunhofer IAO 2018) 	<p>Beschäftigte (DESTATIS 2020) → davon jedoch nur anteilig Recyclings von Fahrzeugbatterien</p> <ul style="list-style-type: none"> Anzahl Beschäftigter im Fahrzeugbatterierecycling in 2019 in Deutschland im einstelligen Bereich (Annahme Öko-Institut auf Basis vertraulicher Informationen diverser Akteure der Wertungskette) Personalbedarf in Europa von bis zu 8 Tsd. beschäftigten bis 2040 (NPM 2021) Personalbedarf in Deutschland bis 2030 130 bis 470 und bis 2404 300 bis 3.300 Beschäftigte (NPM 2021) Allgemein: Personalbedarf von 5 bis 7 Beschäftigten je Kilotonne (NPM 2021)

Tabelle INFRAS/Öko-Institut.

A2. Volkswirtschaftliche Bedeutung 2020, 2030, 2050

Im Folgenden zeigt eine Übersichtstabelle alle relevanten Kennzahlen zur volkswirtschaftlichen Bedeutung der Branchen Batterieproduktion sowie Batterierecycling in den Jahren 2020, 2030 und 2050 auf.

Tabelle 10: Volkswirtschaftliche Bedeutung Batterieproduktion und -recycling

Batterieproduktion	2020	Wettbewerbsfähigkeit gleich				Wettbewerbsfähigkeit sinkt			
		2030	2050	Δ 20-30	Δ 30-50	2030	2050	Δ 20-30	Δ 30-50
Wertschöpfung (Mio. Euro)	600	13.200	18.800	36%	2%	6.200	5.700	26%	0%
Umsatz (Mio. Euro)	3.600	30.500	34.800	24%	1%	12.200	10.600	15%	-1%
Beschäftigte (Anzahl)	2.900	58.200	68.000	35%	1%	25.900	19.700	24%	-1%
Batterierecycling	2020	2030	2050	Δ 20-30	Δ 30-50	2030	2050	Δ 20-30	Δ 30-50
Wertschöpfung (Mio. Euro)	1	100	1.000	60%	13%	100	1.000	60%	13%
Umsatz (Mio. Euro)	2	200	1.800	60%	13%	200	1.800	60%	13%
Beschäftigte (Anzahl)	unbed.	1.000	6.000	65%	9%	1.000	6.000	65%	9%
Total	2020	2030	2050	Δ 20-30	Δ 30-50	2030	2050	Δ 20-30	Δ 30-50
Wertschöpfung (Mio. Euro)	600	13.300	19.800	36%	2%	6.300	6.700	26%	0%
Umsatz (Mio. Euro)	3.600	30.700	36.600	24%	1%	14.400	12.400	15%	-1%
Beschäftigte (Anzahl)	2.900	59.200	74.000	35%	1%	26.900	25.700	25%	0%

Δ 20-30, Δ 30-50: Jährliche Wachstumsraten zwischen 2020 und 2030 resp. 2030 und 2050. Absolute Zahlen sind auf Hunderter gerundet.

unbed.: unbedeutend

Tabelle INFRAS/Öko Institut.

Literatur

- Accurec 2021:** Lithium Batterie Recycling. Accurec Recycling GmbH, Krefeld. URL: <https://accurec.de/lithium?lang=de> (abgerufen am 09.12.2021).
- ADAC 2019:** Elektroauto-Akkus - So funktioniert das Recycling. ADAC e.V., München. URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-akku-recycling/> (abgerufen am 12.12.2021).
- ADAC 2021:** VW ID.3: Das Volks-Elektroauto im ADAC Test. ADAC e.V., München. URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/vw-id-3/> (abgerufen am 17.12.2021).
- Adamas Intelligence 2021:** Global PMSM Market Share Continues to Rise Despite Soaring Rare Earth Prices. Adamas Intelligence, Toronto. URL: <https://www.adamasintel.com/pmsm-market-share-rising-in-face-of-higher-ree-prices/> (abgerufen am 17.12.2021).
- Agora Verkehrswende 2021:** Batteriestandort auf Klimakurs. Perspektiven einer klimaneutralen Batterieproduktion für Elektromobilität in Deutschland. URL: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/Klimaneutrale-Batterieproduktion/59_klimaneutrale_Batterieproduktion.pdf (abgerufen am 06.07.2022).
- Agora Verkehrswende 2022:** Batterieproduktion für Elektromobilität. Angekündigte Zellproduktionskapazitäten in Europa (in GWh). URL: <https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/batterieproduktion-fuer-elektromobilitaet/> (abgerufen am 06.07.2022).
- Akasol 2021:** Durchstarten mit dem Vorreiter in E-Mobility und Speicherung erneuerbarer Energien. Akasol GmbH, Darmstadt. URL: <https://www.akasol.com/de/> (abgerufen am 09.12.2021).
- Al Barazi, S. 2021:** Marktentwicklung und Verfügbarkeit der Batterierohstoffe Lithium, Nickel und Kobalt. Deutsche Rohstoffagentur (DERA). Nadelöhr der Energiewende? Potenziale, Verfügbarkeiten und Effizienz von Batterierohstoffen, 17. MEET Akademie Online, 18. November 2021.
- ATZ 2020:** Batteriezellen Made in Germany – Ein Weg mit Hindernissen. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ). Beitrag von Richard Backhaus. Jahrgang 122 Ausgabe 2/2020.
- BASF 2020:** Spatenstich für BASF-Anlage für Kathodenmaterialien in Schwarzheide. BASF AG, Ludwigshafen. Gemeinsame Presseinformation, 13. November 2020. URL: <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2020/11/p-20-359.html> (abgerufen am 13.12.2021).
- BCG 2020:** Shifting Gears in Auto Manufacturing. Boston Consulting Group (BCG), Köln. URL: <https://web-assets.bcg.com/fd/de/20c24ec2407d9622175e45e84a2c/bcg-shifting-gears-in-auto-manufacturing-sep-2020.pdf> (abgerufen am 17.12.2021).

- BDI 2011:** Deutschland 2030 – Zukunftsperspektiven der Wertschöpfung. Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI), Berlin. ISBN 978-3-00-036796-0. URL: https://www.z-punkt.de/uploads/default/114/2012_bdi_deutschland_2030_de.pdf (abgerufen am 17.12.2021).
- Betz, J; Degreif, S.; Dolega, P. 2021:** State of Play and Roadmap Concept: Mobility Sector, RE-SOURCING Deliverable 4.2. Öko-Institut e.V., Freiburg/Darmstadt. URL: https://re-sourcing.eu/static/5b2eb582e0bd432e53da92bccc290a75/sop_mobility_sector.pdf (abgerufen am 15.12.2021).
- Bloomberg 2020:** Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh. BloombergNEF's annual battery price survey 2020. Bloomberg NEF, New York. URL: <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/> (abgerufen am 15.12.2021).
- Bloomberg 2021:** Hitting the EV Inflection Point – Electric vehicle price parity and phasing out combustion vehicle sales in Europe. Transport&Environment/Bloomberg Finance L.P., New York. URL: https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/08/2021_05_05_Electric_vehicle_price_parity_and_adoption_in_Europe_Final.pdf (abgerufen am 03.12.2021).
- Blume, J. und Witsch, K. 2021:** Vulcan Energy will mit Millionen-Investment Entwicklung der eigenen Lithium-Fördertechnik beschleunigen. Handelsblatt Online, 10.12.2021. URL: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/batterierohstoff-vulcan-energy-will-mit-millionen-investment-entwicklung-der-eigenen-lithium-foerdertechnik-beschleunigen/27880612.html?ticket=ST-6170402-JmTvTrd6nkgKGB6fxTxh-cas01.example.org> (abgerufen am 10.12.2021).
- BMW 2020:** BMW fertigt in Leipzig ab 2021 Batteriemodule in Großserie. electrive.net, 23.09.2020. URL: <https://www.electrive.net/2020/09/23/bmw-fertigt-in-leipzig-ab-2021-batteriemodule-in-grossserie/> (abgerufen am 09.12.2021).
- BMW i 2021:** Automobilindustrie - Faktenblatt. Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi), Berlin. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-automobilindustrie.html> (abgerufen am 17.12.2021).
- BMZ 2021:** Batteriehersteller und Batteriesysteme. BMZ Group, Karlstein. URL: <https://www.bmz-group.com/index.php> (abgerufen am 09.12.2021).
- BOKU et al. 2021:** Entwicklung einer Wertschöpfungskette für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in Österreich. Endbericht. Institut für Abfallwirtschaft Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Lehrstuhl für Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft (AVAW) Montanuniversität Leoben und Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (WIFO),

Wien/Loeben. URL: https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/16/Beigl-et-al_2021_Recycling-von-Lithium-Ionen-Batterien-in-Oesterreich_Endbericht.pdf (abgerufen am 17.12.2021).

Buchert, M.; Manhart, A.; Sutter, J. 2014: Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg. Öko-Institut e.V., Freiburg/Darmstadt. Mit Förderung durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2014. URL: <https://www.oeko.de/oekodoc/2053/2014-630-de.pdf> (abgerufen am 14.12.2021).

Bürgi R. 2021: Elektroauto-Batterien recyceln – Lösung aus der Schweiz. Energie-Experten Online, 30.09.2021. URL: <https://www.energie-experten.ch/de/wissen/detail/elektroauto-batterien-recyceln-loesung-aus-der-schweiz.html> (abgerufen am 10.12.2021).

CAR 2021: Verschärfung der EU CO₂-Anforderungen und die Auswirkungen auf die Arbeitsplätze in der Europäischen Autoindustrie. Center Automotive Research (CAR), Duisburg. URL: https://www.car-future.com/media/center-automotive-research/CO2_Studie/CAR_Jobs_Study_DE.pdf (abgerufen am 15.12.2021).

CEA 2021: ESS Supplier Market Intelligence Program H1 2021 Report Sample. Clean Energy Associates (CEA), Denver, CO. URL: <https://www.cea3.com/cea-blog/lithium-ion-battery-cell-production-capacity-exceed-2500-gwh-by-2025> (abgerufen am 08.12.2021).

Daimler 2021: Batterieproduktion - Gigantische Aussichten...?. Daimler AG, Stuttgart. URL: <https://www.daimler.com/nachhaltigkeit/lebenszyklus-batterie/produktion/> (abgerufen am 09.12.2021).

DESTATIS 2008: Klassifikation der Wirtschaftszweige - Mit Erläuterungen. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. URL: <https://www.destatis.de/static/DE/dokumente/klassifikation-wz-2008-3100100089004.pdf> (abgerufen am 08.12.2021).

DESTATIS 2020: Produzierendes Gewerbe 2019: Beschäftigung, Umsatz, Investitionen und Kostenstruktur der Rechtlichen Einheiten in der Energieversorgung, Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung, Beseitigung von Umweltverschmutzungen. Fachserie 4 Reihe 6.1. Statistisches Bundesamt (Destatis), Wiesbaden. URL: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Beschaeftigte-Umsatz-Investitionen/Publikationen/Downloads-Beschaeftigte/beschaeftigung-umsatz-kostenstruktur-2040610197004.pdf;jsessionid=19E7B9F4915C3441820D29FA3E5B6F8C.live722?__blob=publicationFile (abgerufen am 14.12.2021).

DESTATIS 2021: Produzierendes Gewerbe 2020: Betriebe, Tätige Personen und Umsatz des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden nach Beschäftigtengrößenklassen. Fachserie 4 Reihe 4.1.2. Statistisches Bundesamt

(Destatis), Wiesbaden. URL: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Publikationen/Downloads-Struktur/betriebe-tae-tige-personen-2040412207004.pdf?__blob=publicationFile (abgerufen am 14.12.2021).

Deutsche Lithium 2021: Zinnwald-Lithium-Projekt. Deutsche Lithium GmbH, Freiberg. URL: <http://www.deuschelithium.de/projekte/zinnwald-lithium-projekt/> (abgerufen am 10.12.2021).

Donath, A. 2020: Donath, Andreas (2020): BMW baut künftig Elektromotoren für 500.000 Autos pro Jahr, 03.07.2020. URL: <https://www.golem.de/news/dingolfing-bmw-baut-kuenftig-elektromotoren-fuer-500-000-autos-pro-jahr-2007-149434.html> (abgerufen am 17.12.2021).

Duesenfeld 2021: Umweltfreundliches Recycling von Lithium-Ionen-Batterien, Duesenfeld GmbH, Wendeburg. URL: https://www.duesenfeld.com/index_de.html (abgerufen am 09.12.2021).

EAS 2022: Wegweisende Produkte, EAS Batteries GmbH, URL: <https://eas-batteries.com/de> (abgerufen am 04.08.2022).

EcoBatRec 2016: Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ion-Batterien der Elektromobilität. Gefördert durch das BMU, Berlin, 2016. URL: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/ecobatrec> (abgerufen am 15.12.2021).

Ecomento 2022: Internationale Energieagentur: E-Auto-Boom erhöht Druck auf Lieferketten, URL: <https://ecomento.de/2022/06/02/elektroauto-boom-erhoeht-druck-auf-lieferketten-internationale-energieagentur/> (abgerufen am 09.06.2022).

Econometrics und elementenergy 2018: Low-carbon cars in Europe: A socioeconomic assessment, European Climate Foundation, Februar 2018.

EIT 2021: Future Expert Needs in the Battery Sector. Report March 2021. European Institute of Innovation and Technology (EIT), Budapest. URL: <https://eitrawmaterials.eu/wp-content/uploads/2021/03/EIT-RawMaterials-Fraunhofer-Report-Battery-Expert-Needs-March-2021.pdf> (abgerufen am 17.12.2021).

ElektroMobilität NRW 2020: Wie funktioniert die Batterie? Factsheet. ElektroMobilität NRW, Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf. URL: <https://www.elektromobilitaet.nrw/infos/batterie/> (abgerufen am 14.12.2021).

EnBW 2021: Lithium umweltfreundlich in Deutschland gewinnen. EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Karlsruhe. URL: https://www.enbw.com/unternehmen/presse/artikel/lithium-umweltfreundlich-gewinnen.html?gclid=EAlaIQobChMIhMHH-quB8gIV-AuJ3Ch1GXwqCEAAAYASAAEgkLfD_Bw (abgerufen am 10.12.2021).

- EuRIC 2019:** EuRIC Fakten Metallrecycling. EuRIC AISBL, Brüssel. URL: <https://www.euric-aisbl.eu/position-papers/download/613/335/32> (abgerufen am 17.12.2021).
- European Parliament 2022:** A new EU regulatory framework for batteries. Plenary – March 2022.. European Parliament, Straßburg. URL: [https://www.europarl.europa.eu/Reg-Data/etudes/ATAG/2022/729285/EPRS_ATA\(2022\)729285_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/Reg-Data/etudes/ATAG/2022/729285/EPRS_ATA(2022)729285_EN.pdf) (abgerufen am 06.07.2022).
- EUWID 2021:** BASF baut Prototyp zum Recycling von Lithium-Akkus in Schwarzheide. EUWID Recycling und Entsorgung Online, 30.06.2021. URL: <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/einzelansicht/Artikel/basf-baut-prototyp-zum-recycling-von-lithium-akkus-in-schwarzheide.html> (abgerufen am 14.12.2021).
- Fraunhofer IAO 2018:** ELAB 2.0 - Wirkungen der Fahrzeugelektrifizierung auf die Beschäftigung am Standort Deutschland. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart. URL: https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-5208831.pdf (abgerufen am 10.12.2021).
- Fraunhofer ISI 2016:** Energiespeicher-Monitoring 2016 (Update 2016) - Deutschland auf dem Weg zum Leitmarkt und Leitanbieter?. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe. URL: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2016/Energiespeicher-Monitoring-2016.pdf> (abgerufen am 10.12.2021).
- Fraunhofer ISI 2017:** Energiespeicher-Roadmap (Update 2017) - Hochenergie-Batterien 2030 und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe. URL: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Roadmap-Dezember-2017.pdf> (abgerufen am 14.12.2021).
- Fraunhofer ISI 2020:** Batterien für Elektroautos - Faktencheck und Handlungsbedarf. Sind Batterien für Elektroautos der Schlüssel für eine nachhaltige Mobilität der Zukunft?. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe. URL: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf> (abgerufen am 05.12.2021).
- Fraunhofer ISI 2021:** Recycling von Lithium-Ionen-Batterien - Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau. Kurzstudie, November 2021. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe. URL: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2021/VDMA_Kurzstudie_Batterierecycling.pdf (abgerufen am 10.12.2021).
- Fries M.; Kerler M.; Rohr S.; Schickram S.; Sinning M.; Burda P.; Matz S.; Lienkamp M.; Kochhan R.; Fuchs S.; Reuter B. 2017:** An Overview of Costs for Vehicle Components,

Fuels, Greenhouse Gas Emissions and Total Costs of Ownership (Update 2017). Technische Universität München (TUM), München.

Harrison und Ludwig 2021: Electric Vehicle Battery Supply Chain Analysis - How Battery Demand and Production Are Reshaping the Automotive Industry. Automotive from Ultima-Media. INSIGHT, März 2021. URL: <https://www.automotivelogistics.media/electric-vehicles/electric-vehicle-battery-supply-chain-analysis-2021-how-lithium-ion-battery-demand-and-production-are-reshaping-the-automotive-industry/41924.article> (abgerufen am 06.12.2021).

HNA 2019: VW baut ab 2020 neue Schnellladesäule in Hannover - Kassel soll 800.000 E-Motoren liefern. Konzern baut Ladesäulen künftig selbst. Hessische/Niedersächsische Allgemeine (HNA), Kassel. URL: <https://www.hna.de/lokales/kreis-kassel/baunatal-ort312516/vw-werk-hannover-soll-ab-2020-neue-schnellladesaeule-bauen-11483843.html> (abgerufen am 06.12.2021).

IAB 2018: Elektromobilität 2035 - Effekte auf Wirtschaft und Erwerbstätigkeit durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Personenkraftwagen. IAB-Forschungsbericht 08/2018. Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB), Nürnberg. SSN 2195-2655. URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/204764/1/1041968140.pdf> (abgerufen am 17.12.2021).

IEA 2021: Net Zero by 2050 – A Road Map for the Global Energy Sector. Revised version, October 2021 (4th revision). International Energy Agency (IEA), Paris. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/Net-Zeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf (abgerufen am 10.12.2021).

ifo 2019: Fahrzeugbau – Wie verändert sich die Wertschöpfungskette? ifo-Studie im Auftrag des BIHK. ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V., München. URL: https://www.ifo.de/DocDL/ifo-Studie_Fahrzeugbau_IHK_Impulse.pdf (abgerufen am 17.12.2021).

ifo 2021: Auswirkungen der vermehrten Produktion elektrisch betriebener Pkw auf die Beschäftigung in Deutschland. ifo-Studie im Auftrag des Verbands der Automobilindustrie. ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V., München. URL: https://www.ifo.de/DocDL/ifoStudie-2021_Elektromobilitaet-Beschaeftigung.pdf (abgerufen am 17.12.2021).

IPE; IKA; fka; Roland Berger 2019: Automobile Wertschöpfung 2030-2050. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Endbericht. Institut für Politikevaluation GmbH (IPE), fka GmbH, Institut für Kraftfahrzeuge RWTH Aachen University (IKA), Roland Berger GmbH. URL:

- https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=16 (abgerufen am 10.12.2021). Bauer et al. 2018
- Jordan, M. 2019:** Daimler produziert elektrischen Antriebsstrang eATS selbst, 11. Dez. 2019. mbpassion Online. URL: <https://mbpassion.de/2019/12/daimler-produziert-elektrischen-antriebsstrang-eats-selbst/> (abgerufen am 17.12.2021).
- Kampker, A.; Vallée, D.; Schnettler, A. (Hrsg.) 2018:** Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Springer Vieweg Verlag Berlin/Heidelberg. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53137-2>.
- KBA 2021:** Steigende Zulassungszahlen im Jahr 2020 im Segment der Wohnmobile. Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Flensburg. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Segmente/2020/2020_n_segmen-te_kurzbericht_pdf.pdf;jsessionid=BAF0325F6964A895C915074B598252B0.live11293?__blob=publicationFile&v=3 (abgerufen am 10.12.2021).
- Köllner 2021:** Faktencheck Elektroauto-Batterien. Springer Professional Online. URL: <https://www.springerprofessional.de/batterie/elektrofahrzeuge/faktencheck-elektroauto-batterien/17624376> (abgerufen am 17.12.2021).
- König A.; Nicoletti L.; Schröder D.; Wolff S.; Waclaw A. Lienkamp M. 2021:** An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles. World Electric Vehicle Journal 2021, 12(1), 21. DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj12010021> (abgerufen am 17.12.2021).
- Kwade, A.; Diekmann J. 2018:** Recycling of Lithium-Ion Batteries. Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-70572-9.
- Leclanché 2020:** Willstätt wird zum E-Mekka. Econo Online. URL: <https://www.econo.de/aktuelles/artikel/willstaett-wird-zum-e-mekka-7937/> (abgerufen am 08.12.2021).
- LiBRi 2011:** Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge. Lithium-Ionen Batterierecycling Initiative – LiBRi. Abschlussbericht, gefördert durch das BMU, Berlin, 2011. URL: http://erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-libri_1.pdf (abgerufen am 15.12.2021).
- LithoRec I 2012:** Recycling von Lithium-Ionen-Batterien - LithoRec I. Abschlussbericht, im Rahmen des FuE-Programms "Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität", Braunschweig, 2012. URL: <https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-lithorec.pdf> (abgerufen am 15.12.2021).
- LithoRec II 2016:** Recycling von Lithium-Ionen-Batterien - LithoRec II. Abschlussbericht, Verbundprojekt im Rahmen des Förderprogramms „Erneuerbar Mobil“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Braunschweig, 2016. URL:

http://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/Abschlussbericht_Litho-Rec_II_20170116.pdf (abgerufen am 15.12.2021).

McKinsey 2022: Capturing the battery value-chain opportunity. McKinsey & Company, New York. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/capturing-the-battery-value-chain-opportunity> (abgerufen am 11.01.2022).

Nickelhütte Aue 2021: Wir überzeugen mit unserer Leistung. Nickelhütte Aue GmbH, Aue-Bad Schlema. URL: <https://nickelhueette-aue.de/de/services> (abgerufen am 09.12.2021).

Niggehoff, L.-T. 2021: Jetzt steigen deutsche Unternehmen ins Batterierecycling ein. WirtschaftsWoche Online, 21.09.2021. URL: <https://www.wiwo.de/unternehmen/mittelstand/wertvolle-metalle-in-e-auto-batterien-jetzt-steigen-deutsche-unternehmen-ins-batterierecycling-ein/27622054.html> (abgerufen am 14.12.2021).

NPE 2018: Fortschrittsbericht 2018 – Markthochlaufphase. Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), Berlin. URL: https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/12/2018_Fortschrittsbericht_2018_Markthochlaufphase.pdf (abgerufen am 04.12.2021).

NPM 2019: Erster Zwischenbericht zur Wertschöpfung. Arbeitsgruppe 4 – „Sicherung des Mobilitäts- und Produktionsstandortes, Batteriezellproduktion, Rohstoffe und Recycling, Bildung und Qualifizierung“, Fokusgruppe Wertschöpfung. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM), Berlin. URL: <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/03/NPM-AG-4-1-Zwischenbericht-zur-Wertsch%C3%B6pfung.pdf> (abgerufen am 04.12.2021).

NPM 2021: Batterierecyclingmarkt Europa – Chancen für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft. Arbeitsgruppe 4 – „Sicherung des Mobilitäts- und Produktionsstandortes, Batteriezellproduktion, Rohstoffe und Recycling, Bildung und Qualifizierung“. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM), Berlin. URL: https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/10/NPM_AG4_Batterierecycling.pdf (abgerufen am 04.12.2021).

NZZ 2021: Tesla, Volkswagen, Porsche – Deutschland wird zum Zentrum der europäischen Batteriezellen-Produktion. Neue Zürcher Zeitung (NZZ), Zürich/Frankfurt am Main. URL: <https://www.nzz.ch/wirtschaft/deutschland-wird-zum-zentrum-der-batterieproduktion-ld.1631548?reduced=true> (abgerufen am 14.12.2021).

Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES GmbH, Thünen-Institut 2021: Projektionsbericht 2021 für Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz (BMUV), Berlin/Karlsruhe/Braunschweig/Eberswalde/Hamburg. URL: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/projektionsbericht_2021_bf.pdf (abgerufen am 07.02.2022).

- Piątek J; Afyon S.; Budnyak T.; Budnyk S.; Sipponen M; Slabon A. 2021:** Sustainable Li-Ion Batteries - Chemistry and Recycling. *Advanced Energy Materials* 2021 (11), S. 1-31. DOI: 10.1002/aenm.202003456. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/aenm.202003456> (abgerufen am 14.12.2021).
- Plötz P. und Eichhammer W. 2011:** Zukunftsmarkt Effiziente Elektromotoren. Fallstudie im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“. URL: https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-2139256.pdf (abgerufen am 14.12.2021).
- rbb 2021:** Größte Lithium-Raffinerie Europas geplant - Projekt in Brandenburg, 11.10.2021, Tagesschau/rbb Online. URL: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/rock-tech-lithium-101.html> (abgerufen am 13.12.2021).
- Reuter B.; Riedl J.; Hamacher T.; Lienkamp M.; Bradshaw A. 2014:** COFAT 2014 – Future resource availability for the production of Lithium-Ion-vehicle batteries. Conference Paper. URL: https://www.researchgate.net/profile/Benjamin-Reuter/publication/263888647_COFAT_2014_-_Future_Resource_Availability_for_the_Production_of_Lithium-Ion_Vehicle_Batteries/links/53fdcd430cf2dca800039068/COFAT-2014-Future-Resource-Availability-for-the-Production-of-Lithium-Ion-Vehicle-Batteries.pdf?origin=publication_detail (abgerufen am 10.12.2021).
- RWTH 2014:** Modellierung der zukünftigen elektromobilen Wertschöpfungskette und Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Stärkung des Elektromobilitätsstandorts NRW. Gemeinschaftlicher Abschlussbericht. Institut für Kraftfahrzeuge RWTH Aachen University (IKA), Aachen. URL: <https://www.ika.rwth-aachen.de/images/forschung/projekte/evchain/abschlussbericht-evchain-nrw.pdf> (abgerufen am 10.12.2021).
- Spath D.; Bauer W.; Friedrich H.; Dispan J. 2012:** Elektromobilität und Beschäftigung - Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung (ELAB). Wirkungsanalyse alternativer Antriebskonzepte am Beispiel einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion. Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf. URL: https://www.boeckler.de/pdf/pub_ELAB_2012.pdf (abgerufen am 10.12.2021).
- Statistisches Bundesamt (Destatis) 2020:** Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Input-Output-Rechnung 2016, Fachserie 18, Reihe 2.
- Thies, C.; Kieckhäfer, K.; Hoyer, C.; Spengler, T. 2018:** Economic Assessment of the LithoRec Process. In Kwade, A. und Diekmann, J. 2018: *Recycling of Lithium-Ion Batteries*. S. 253-266. Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-70572-9.

- USGS 2021:** Lithium - U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2021. URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-lithium.pdf> (abgerufen am 20.12.2021).
- VDE 2019:** Batteriezellfertigung für die Elektromobilität in Deutschland. VDE-Positionspapier. Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE), Frankfurt am Main. URL: <https://www.vde.com/resource/blob/1876056/bf663ae459e3be4cf57ea6994767b973/positionspapier-batteriezellfertigung-in-deutschland-data.pdf> (abgerufen am 17.12.2021).
- VDI/VDE-IT 2021:** 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. VDI/VDE-IT, Berlin. URL: https://vdivde-it.de/sites/default/files/document/Studie_Nachhaltigkeit_der_Batteriezellfertigung_in_Europa.pdf (abgerufen am 17.12.2021).
- VDMA 2018:** Roadmap Battery Production Equipment 2030. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA), Frankfurt am Main. URL: https://www.researchgate.net/profile/Stefan-Doose/publication/351451658_Roadmap_Batterie-Produktionsmittel_2030_-_Update_2020/links/609919b0299bf1ad8d8e386f/Roadmap-Batterie-Produktionsmittel-2030-Update-2020.pdf?origin=publication_detail (abgerufen am 10.12.2021).
- Volkswagen 2021:** Volkswagen erwägt zweite Batteriefabrik in Salzgitter, 15.05.2021. ManagerMagazin Online. URL: <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/volkswagen-erwaegt-zweite-batteriefabrik-in-salzgitter-a-c222e648-d45b-492a-8f2a-1fa3b8512c1e> (abgerufen am 09.12.2021).
- von der Eltz, F. 2021:** Neue Lithium-Fabrik in Bitterfeld geplant. mdr Online, 02.11.2021. URL: <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen-anhalt/dessau/bitterfeld/lithium-fabrik-chemiepark-100.html> (abgerufen am 13.12.2021).
- Vulcan Energy 2021:** Zero Carbon Lithium. Vulcan Energy Resources GmbH, Karlsruhe. URL: <https://v-er.eu/de/zero-carbon-lithium-de/> (abgerufen am 10.12.2021).
- Werwitzke, C. 2021:** Volkswagen: Deals mit Umicore, 24M und Vulcan Energy. electrive.net, 08.12.2021. URL: <https://www.electrive.net/2021/12/08/volkswagen-deals-mit-umicore-24m-und-vulcan-energy/> (abgerufen am 10.12.2021).
- Wietschel M.; Thielmann A.; Plötz P.; Gnann T.; Sievers L.; Breitschopf B.; Doll C.; Moll C. 2017:** Perspektiven des Wirtschaftsstandorts Deutschland in Zeiten zunehmender Elektromobilität. Working Paper Sustainability and Innovation No. S 09/2017. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe. URL: <https://www.econsortor.eu/handle/10419/167584> (abgerufen am 06.12.2021).

ZVEI 2021: Faktenblatt - Deutscher Batteriemarkt wächst trotz Corona dynamisch weiter. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI), Frankfurt am Main. URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Pressebereich/2021-051_Batteriemarkt_waechst_waehrend_der_Pandemie_stark/ZVEI_Faktenblatt_Wachstum_Batterien.pdf (abgerufen am 14.12.2021).