

Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungs- bedarf – Ein Update

perspektiven

policy brief

01-2025

Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungs- bedarf – Ein Update

Sind Batterien für Elektroautos der Schlüssel für eine nachhaltige Mobilität der Zukunft?

Autor:innen

Martin Wietschel, Axel Thielmann, Till Gnann, Tim Hettesheimer, Sabine Langkau, Christoph Neef, Patrick Plötz, Luisa Sievers, Luis Tercero Espinoza, Jakob Edler, Michael Krail, Claus Doll, Steffen Link, Annegret Stephan, Aline Scherrer, Marian Klobasa, Daniel Speth, Tim Wicke, Michaela Schicho, Ann Wahu Kamamia, Antonia Loibl

Weitere Informationen

Der Policy Brief »Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf – Ein Update« stammt aus der Schriftenreihe des Fraunhofer ISI »Perspektiven – Policy Briefs« und speist sich aus Erkenntnissen und Studienergebnissen unserer Batterieforschung sowie unserem Querschnittsthema Elektromobilität.

Mehr Infos unter folgenden Links:

- Policy Briefs
- Batterieforschung
- Elektromobilität

Inhalt

Überblick und Kernaussagen 7

Einleitung 12

Die Fragen im Detail 15

01 Wie entwickelt sich die Elektromobilität und die Batterienachfrage weltweit und in Deutschland? 15

02 Sind E-Fahrzeuge in Deutschland wirtschaftlich? 17

03 Ist die Umweltbilanz von E-Pkw besser als bei konventionellen Pkw? 18

04 Wie entwickelt sich die Leistungsfähigkeit von Batterien weiter? 18

05 Reichen die Rohstoffe global aus? 20

06 Welche Faktoren sind für eine wettbewerbsfähige Zellfertigung wichtig? 21

07 Gibt es Lieferengpässe und Risiken entlang der Wertschöpfungskette? 24

08 Welche Herausforderungen ergeben sich für den Arbeitsmarkt? 24

09 Welche Reichweiten sind zu erwarten und wie entwickelt sich die Ladeinfrastruktur? 25

10 Was passiert mit den Altbatterien? 26

11 Ist die Nutzung der Pkw-Batterie als mobiler Speicher sinnvoll? 28

12 Welche Maßnahmen können die sozialen und ökologischen Auswirkungen in der Wertschöpfungskette verbessern? 29

13 Ist die Brandgefahr von E-PKW hoch? 30

14 Wer möchte E-Autos und wie stabil ist das Interesse an der Elektromobilität? 31

Literatur 33

Impressum 41

Überblick und Kernaussagen

In der Politik und in der Industrie besteht ein weitgehender Konsens, dass batterieelektrische Pkw (E-Pkw) in der Zukunft eine sehr wichtige Rolle spielen werden.

Betrachtet man die zentralen Fragen entlang der gesamten Batterie-Wertschöpfungskette, so zeigt sich, dass der weiter voranschreitenden breiten Marktdiffusion batterieelektrischer Pkw nichts Unüberwindbares im Weg steht. Jedoch gilt es noch einige technologische, ökonomische, ökologische, regulative und gesellschaftliche Herausforderungen in den kommenden Jahren anzugehen. Diese Herausforderungen sind, politischer Wille vorausgesetzt, zu bewältigen. Im nachfolgenden Teil werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und in den späteren Einzelkapiteln folgt eine ausführliche Darstellung.

Hinweis: Der vorliegende Policy Brief erschien unter gleichem Titel bereits im Jahr 2020, wurde inhaltlich aber komplett überarbeitet sowie um neue Aspekte ergänzt. Er spiegelt den Forschungsstand aus dem Februar 2025 wider.

der Kaufprämien und aufgrund hoher Strompreise wieder ab, insbesondere was die reinen batterieelektrischen Fahrzeuge anbelangt. Ob dieser Trend nur ein kurzfristiger Effekt ist oder Aspekte wie die EU-Flottengrenzwerte und sinkende E-Pkw-Preise diesen wieder umkehren, wird sich erst in Zukunft zeigen. Die weltweite Entwicklung bei E-Pkw treibt die Nachfrage nach Batteriekapazitäten weiter in die Höhe. Die Nachfrage steigt in 2030 im Vergleich zu 2023 um den Faktor 4 bis 6 und in 2035 um den Faktor 7 bis 11. Wenn der Blick auf die gesamten nachgefragten Batteriekapazitäten gerichtet wird, dominieren die Anwendung für den Straßenverkehr mit rund 85 bis 90 Prozent im Jahr 2030 den Markt.

→ **Mehr Info auf Seite 15**

02

Sind E-Fahrzeuge wirtschaftlich?

In der Anschaffung sind E-Fahrzeuge heute ohne Förderung noch teurer als konventionelle Fahrzeuge. Allerdings haben sich die Anschaffungskosten aufgrund sinkender Batteriepreise und wachsendem internationalen Wettbewerb in den letzten Jahren merklich reduziert. Unterstützt durch die 2025 zu erreichenden CO₂-Flottengrenzwerte der EU dürfte sich dieser Trend in Deutschland fortsetzen, da die Hersteller die Fahrzeuge absetzen wollen. Innerhalb der nächsten Jahre ist zu erwarten, dass sich die Anschaffungspreise für viele E-Fahrzeuge bereits auf einem ähnlichen Niveau wie die vergleichbarer Verbrenner einpendeln werden. Aufgrund geringerer laufender Betriebskosten schneiden E-Fahrzeuge teilweise schon heute bei den Gesamtkosten besser ab, wobei derzeit bei den Wiederverkaufswerten noch Unsicherheiten existieren. Der positive wirtschaftliche Trend wird sich künftig weiter fortsetzen. So wird zum Beispiel gesteuertes und bidirektionales Laden künftig deutlich positive Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit haben (vergleiche Frage 09 und 11).

01

Wie entwickelt sich die Elektromobilität und die Batterienachfrage weltweit und in Deutschland?

Weltweit gesehen ist die Nachfrage nach E-Pkw in den letzten Jahren deutlich gestiegen und beträgt derzeit knapp 20 Prozent an den Neuzulassungen mit einem Wachstumstrend in vielen Märkten. Treiber dieser Entwicklung ist insbesondere der weltweit größte Pkw-Markt China, aber auch in den USA und in der EU steigen die Zahlen weiter an. Gemäß einschlägiger internationaler Studien kann der weltweite Anteil von heute knapp 20 auf 40 Prozent an Neufahrzeugen bis 2030 und mehr als 50 Prozent in 2035 wachsen. Ein wesentlicher Treiber dafür ist die Einhaltung ambitionierter Klimaschutzziele. Bis 2023 sind die Neuzulassungszahlen auch in Deutschland stetig gestiegen und lagen über der weltweiten Marktentwicklung. Allerdings fielen sie 2024 aus diversen Gründen wie einem abrupten Förderstopp

Die Vorteilhaftigkeit bei den Gesamtkosten sollte dem Endkunden verdeutlicht werden, da heute bei privaten Kaufentscheidungen oft der Anschaffungspreis im Vordergrund steht. Auch staatliche Förderpolitiken sollte deshalb eine Preissenkung bei der Anschaffung verstärkt in den Blick nehmen.

→ **Mehr Info auf Seite 17**

03

Ist die Umweltbilanz von E-Pkw besser als bei konventionellen Pkw?

Heute in Deutschland gekaufte E-Pkw weisen ganzheitlich betrachtet von Herstellung, Nutzung bis zur Entsorgung eine deutlich positive Treibhausgasbilanz gegenüber konventionellen Pkw auf (40 bis 50-prozentige Minderung bei durchschnittlicher Fahrleistung für ein Mittelklasse-Pkw). Die höheren Emissionen in der Herstellung der Fahrzeuge werden in der Nutzungsphase überkompensiert. Eine energieeffiziente und auf erneuerbare Energiequellen fokussierte Batterieproduktion, mehr erneuerbarer Strom beim Laden, gesteuertes Laden (vergleiche auch Frage 11) und ein geschlossener Ressourcenkreislauf (vergleiche Frage 10) verbessern potenziell die Klima- und Umweltbilanz von E-Pkw weiter. Wie bei jedem motorisierten Individualverkehr geht allerdings auch die Nutzung von E-Pkw mit nennenswerten Umweltbelastungen einher, so dass eine Verkehrswende auch ein verändertes Mobilitätsverhalten (unter anderem weniger und kleinere Fahrzeuge, weniger Fahrten) beinhalten muss. Negative ökologische Auswirkungen haben die E-Pkw unter anderem bei Versauerung, Überdüngung und der Nutzung kritischer Rohstoffe, wobei sich durch neue Batterietypen und Recycling (vergleiche Fragen 04, 05 und 09) bei zumindest einigen der kritischen Rohstoffe eine deutliche Reduzierung des Einsatzes kritischer Rohstoffe oder sogar deren vollkommenen Vermeidung abzeichnet. Hier sollten die Regularien entsprechend gesetzt werden.

→ **Mehr Info auf Seite 18**

04

Wie entwickelt sich die Leistungsfähigkeit von Batterien weiter?

Batterien werden sich auch zukünftig im Bereich der Materialien, Batteriezelldesigns aber auch Packdesigns auf Fahrzeugebene weiterentwickeln. Bis 2030 ist zum Beispiel bei der Energiedichte nochmals ein großer Fortschritt von bis zu 30 Prozent zu erwarten. Dies macht Batterien leichter und kleiner oder kann

die Fahrzeugreichweite erhöhen. Dahinter stehen Innovationen wie hoch-nickelreiche Kathodenmaterialien, Siliziumanoden und neue Zell- und Packdesigns zur besseren Systemintegration. Letztere optimieren neben dem Platzbedarf auch das thermische Management und die Sicherheit der Batteriesysteme (vergleiche Frage 13). Mit diesen Fortschritten ändern sich auch die Schnellademöglichkeiten für Batterien. So sind Ladefenster im Bereich von 10 bis 20 Minuten realisierbar, bei gleichzeitig hohen Lebensdauern von mindestens 15 Jahren – wichtige Themen für eine Erhöhung der Nutzerakzeptanz.

→ **Mehr Info auf Seite 18**

05

Reichen die Rohstoffe global aus?

Kritische Rohstoffe für Batterien wie Lithium, Kobalt, Nickel, Mangan und Graphit sind weltweit ausreichend vorhanden, jedoch sind temporäre Lieferengpässe oder Preissteigerungen auch mittelfristig nicht auszuschließen. Dies hängt zum einen mit der hohen Dynamik der Batterienachfrage und zum anderen mit der hohen Markkonzentration und Importabhängigkeit Deutschlands und der EU aufgrund geringer bis fehlender Eigenproduktion dieser Rohstoffe zusammen. Kernherausforderungen dabei sind der Finanzierungsbedarf, die Umsetzung eines schnellen Aufbaus der Bergbauprojekte und die Akzeptanz für diese im Inland, denn der Großteil der benötigten Rohstoffe wird aus primären Quellen bereitgestellt werden müssen. Zur Reduzierung des Problems bieten sich nachfrageseitig neue (eisen- und manganbasierte oder kobaltfreie) Lithium-Ionen-Batteriechemien sowie alternative Technologien wie Natrium-Ionen Batterien an. Zudem kann das Recycling in Europa dazu beitragen, die Rohstoffversorgung aus dem Bergbau zu ergänzen. Durch den Ausbau eigener Abbauprojekte und Weiterverarbeitungsanlagen sowie durch verstärktes Recycling könnte Europa langfristig nennenswerte Teile seines steigenden Rohstoffbedarfs selbst decken. Die Abhängigkeit von Rohstoffimporten ist jedoch nicht vollständig vermeidbar.

→ **Mehr Info auf Seite 20**

06

Welche Faktoren sind für eine wettbewerbsfähige Zellfertigung wichtig?

Die Fahrzeugbatterie hat heute einen relevanten Anteil an der E-Pkw-Wertschöpfung (bei Mittelklasse-Pkw circa ein Drittel). Die internationale Wettbewerbsfähigkeit einer Batteriezellfertigung

in Deutschland und Europa hängt von unterschiedlichen Faktoren wie den Investitionen, den Betriebsausgaben, dem hierzulande vorhandenen technologischem Know-how, dem Zugang zu Lieferketten und nicht zuletzt den politischen Rahmenbedingungen und Fördermaßnahmen ab. Europa konkurriert insbesondere mit den USA und Asien. Zwar ist Europa in der Grundlagenforschung stark, doch stellen hohe Energiepreise, längere Bauzeiten, vor allem durch Bürokratiehürden, und weniger Erfahrung bei der skalierten Produktion große Herausforderungen dar.

So hemmen oder verzögern aktuell Probleme beim Hochlauf und lange Genehmigungsverfahren einige europäische Projekte und verzögern diese. Von Seiten der Politik sind einige regulative, aber auch unterstützende Maßnahmen auf den Weg gebracht worden, die sowohl den hohen Investitionsbedarf abfedern sollen, aber auch bei Themen wie Forschung und Entwicklung sowie der Ausbildung von Fachkräften ansetzen.

→ **Mehr Info auf Seite 21**

07

Gibt es Lieferengpässe und Risiken entlang der Wertschöpfungskette?

Die nach 2023 zurückgehenden Verkaufszahlen für Elektrofahrzeuge in Deutschland (vergleiche Frage 01) sind nicht auf Lieferengpässe bei den Fahrzeugen zurückzuführen. Verdeutlicht wird dies auch durch eine Verkürzung der durchschnittlichen Lieferzeit der Fahrzeuge auf vier Monate. Trotzdem stellt der Hochlauf bei der Produktion von E-Pkw eine Herausforderung für die Beschaffung der Traktionsbatterien dar. Die Batteriezellproduktion und deren vorgelagerte Zulieferindustrie verfügt zwar über ausreichend Kapazitäten, jedoch befinden sich die Fertigungsstätten größtenteils in Asien. Insbesondere China dominiert große Teile der Wertschöpfungskette. Geopolitische Krisen können die Resilienz der Lieferketten stark beeinflussen.

Europäische und auch amerikanische Hersteller setzen daher auf Multi-Sourcing-Strategien flankiert durch den Aufbau eigener Produktionskapazitäten. Langfristig wird die Abhängigkeit von asiatischen Batteriezellen deshalb voraussichtlich sinken. Die Komplexität globaler Lieferketten bei E-Pkw bleibt jedoch eine Herausforderung.

→ **Mehr Info auf Seite 24**

08

Welche Herausforderungen ergeben sich für den Arbeitsmarkt?

Trotz unterschiedlicher Beurteilungen der Beschäftigungseffekte in der Automobil- und Zulieferindustrie wird in Deutschland von der überwiegenden Zahl an Studien ein nennenswerter Beschäftigungsrückgang in dieser wichtigen Wirtschaftsbranche erwartet. Die Batteriezellproduktion selbst ist hochautomatisiert, weshalb die positiven Arbeitsplatzeffekte dort limitiert sind. Schließt man die vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsketten – zum Beispiel in der Stromerzeugung, der Ladeinfrastruktur und der Digitalisierung – mit in die Betrachtung ein, so sind die sich daraus ergebenden Arbeitsplatzeffekte jedoch relevant und könnten negative Arbeitsplatzeffekte innerhalb der Automobilindustrie kompensieren oder gar weitere in sich neu entwickelnden Branchen schaffen. Sie hängen aber stark davon ab, ob und wo sich deutsche und europäische Unternehmen langfristig wettbewerbsfähig platzieren werden können.

Wichtig ist es, die Systemgrenzen bei der Bewertung solcher Beschäftigungseffekte richtig zu setzen und zu verstehen. Denn die Automobil- und Zulieferindustrie ist im Wandel. So entstehen auch völlig neue Tätigkeitsfelder und damit Arbeitsplätze innerhalb aber auch jenseits der Automobilindustrie. Es gilt diesen Strukturwandel über Branchen und Regionen hinweg durch aktive industrie- und arbeitsmarktpolitische Maßnahmen – im Verbund mit natürlicher Altersfluktuation – sozialverträglich zu gestalten. Dies erfordert die Umsetzung von Umschulungs- und Weiterbildungsmaßnahmen in und für Unternehmen. Fachkräfte mit batteriespezifischem Know-how gilt es auszubilden und zu sichern. Denn hier droht in einer Zukunftsbranche eine wachsende Lücke an hoch ausgebildeten Batterieexperten, die als Multiplikatoren für vor- und nachgelagerte Jobs wirken.

→ **Mehr Info auf Seite 24**

09

Welche Reichweiten sind zu erwarten und wie entwickelt sich die Ladeinfrastruktur?

Heutige E-Pkw-Topmodelle bieten mindestens 400 km Reichweite, während einige zukünftige Modelle über 1.000 km anstreben, ermöglicht durch fortschrittliche Batteriesysteme (vergleiche Frage 04). Während die Batterietechnologie entsprechende Reichweiten erlaubt, sprechen die mit der Reichweite ansteigenden Kosten sowie die ökologischen Folgen (vergleiche Frage 03 und 12) für die Nutzung kleinerer Batterien. Da viele Fahrer:innen 400 km Reichweite – insbesondere mit immer

schnelleren Ladezeiten – in der Praxis als ausreichend empfinden, wird im Durchschnitt nur ein moderater Anstieg der Reichweite erwartet.

Der Ausbau der Ladeinfrastruktur sowie der Anstieg der Ladeleistung ist entscheidend, um kleinere Batterien zu nutzen. Für das Laden von E-Pkw ist heute und in Zukunft vor allem Ladeinfrastruktur zu Hause oder am Arbeitsplatz wichtig. Lastmanagement kann dabei Kosten im Stromverteilnetz vermeiden und die Integration erneuerbarer Energien unterstützen. Gesetzliche Rahmenbedingungen verstärken den Ausbau von Ladeinfrastruktur im halböffentlichen Raum wie an Supermärkten für Nutzer:innen ohne eigenen Stellplatz. Das öffentliche Schnellladenetz, wichtig für Langstreckenfahrten, ist heute bereits gut ausgebaut, muss aber mit dem Anstieg des elektrischen Fahrzeugbestands bedarfsgerecht kontinuierlich erweitert werden. Bidirektionales Laden wird sich in der Zukunft etablieren, hilft die Ladekosten zu senken (vergleiche Frage 11) und hat positive Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaftlichkeit der E-Pkw. Die schon bestehenden gesetzlichen Regelungen sollten dafür weiterentwickelt und die Nutzer:innen verstärkt für das Thema sensibilisiert werden.

→ **Mehr Info auf Seite 25**

10

Was passiert mit den Altbatterien?

Die »Batterie-Verordnung« (Verordnung (EU) 2023/1542) regelt die Sammlung und das Recycling von Altbatterien, insbesondere im Hinblick auf den wachsenden Markt für Elektrofahrzeuge. Prognosen gehen davon aus, dass langfristig ausreichend Recyclingkapazitäten für anfallende End-of-Life Batterien sowie Produktionsausschuss zur Verfügung stehen. Bis zum Jahr 2035 könnten dabei bis zu 30 Prozent des Bedarfs an Lithium, Nickel und Kobalt für die Batteriezellenproduktion durch recycelte Materialien gedeckt werden.

Das Recycling von Batterien beinhaltet Prozesse wie Sammlung, Entladung, Demontage und mechanische Verarbeitung oder Hochtemperaturschmelzen. Durch diese Prozesse lassen sich wertvolle Materialien wie Kobalt, Nickel und Lithium zurückgewinnen. Die Rentabilität des Batterierecyclings hängt dabei stark von der chemischen Zusammensetzung der Batterie und den aktuellen Börsenpreisen für die Rohstoffe ab. Der Restwert aktueller Elektrofahrzeugbatterien am Ende ihrer Lebensdauer wird in der Regel auf 10–20 Prozent des ursprünglichen Preises beziffert.

Neben dem Recycling stellen aktuell vor allem Repair- und Refresh- sowie Second-Use-Konzepte eine Option für noch

verwendbare Batterien dar, um die effektive Batterielebensdauer zu verlängern und den ökologischen Fußabdruck zu verringern. Studien legen nahe, dass eine Kombination aus Zweitnutzung und Recycling den ökologischen Fußabdruck von Batterien um 35–80 Prozent reduzieren kann.

→ **Mehr Info auf Seite 26**

11

Ist die Nutzung der PKW-Batterie als mobiler Speicher sinnvoll?

Durch das bidirektionale Laden (mit Rückspeisung) von E-Pkw ergeben sich künftig Vorteile sowohl für das Stromsystem als auch für die Nutzenden, wenn die Voraussetzungen dafür geschaffen werden. Weiterhin lassen sich Erneuerbare Energien besser integrieren, Netzüberlastungen reduzieren und die Gesamtsystemkosten senken. In Deutschland lassen sich hierdurch erhebliche finanzielle Einsparungen im Energiesystem realisieren. Für Pkw-Nutzende besteht ebenfalls ein großes Einsparpotenzial, abhängig von Faktoren wie Fahrverhalten, Standorten, Batteriegröße und Verfügbarkeit einer Photovoltaikanlage. Mögliche negative Effekte auf die Batteriealterung stellen heute meist kein Hindernis (mehr) dar. Die künftige Verbreitung von Smart Metern, bidirektional ladefähigen Fahrzeugen und Infrastrukturen sowie dynamischen Stromtarifen steigern das technische Potenzial beziehungsweise die wirtschaftliche Attraktivität. Regulatorisch sind Heimanwendungen gut umsetzbar. Bei Netzanwendungen bestehen noch größere Hürden wie beispielsweise finanzielle Doppelbelastungen beim Be- und Entladen und fehlende Kompatibilität unterschiedlicher Fahrzeuge mit unterschiedlicher Ladeinfrastruktur. Zudem ist eine hohe Akzeptanz der Nutzenden essenziell.

→ **Mehr Info auf Seite 28**

12

Welche Maßnahmen können die sozialen und ökologischen Auswirkungen in den globalen Wertschöpfungsketten der Batterien verbessern?

Die Gewinnung von Rohstoffen und die Herstellung von technischen Komponenten sind unabhängig von der Antriebstechnologie mit ökologischen und sozialen Risiken in globalen Wertschöpfungsketten behaftet (zum Beispiel toxische Emissionen oder Menschenrechtsverletzungen), welche umso gravierender ausfallen, je schwächer die Gesetzgebung und staatliche Institutionen in den jeweiligen Ländern sind. Gesetzliche Vorgaben zu

unternehmerischen Sorgfaltspflichten schaffen einheitliche Voraussetzungen für mehr Transparenz und eine Verbesserung der sozialen und ökologischen Konditionen entlang der Wertschöpfungsketten. Da ein Boykott von Regionen mit ökologischen und sozialen Risiken die Situation der betroffenen Menschen oft verschlimmert, gilt es sich auf eine Verbesserung der Bedingungen auf Kontrolle und Unterstützung zu fokussieren.

→ **Mehr Info auf Seite 29**

13

Ist die Brandgefahr bei E-PKW hoch?

Elektrofahrzeuge brennen nach heutigem Kenntnisstand nicht häufiger im Vergleich zu konventionellen Pkw. Einige internationale Studien gehen sogar von einer deutlich niedrigeren Brandgefahr aus. Derzeit neue in den Markt kommende Batterietypen weisen gegenüber den herkömmlichen LIB-Batterien bezüglich der Brandgefahr nochmals deutlich niedrigere Brandrisiken auf (vergleiche Frage 02). Das Löschen von Bränden bei E-Pkw ist aufwendiger und zeitintensiver, aber verschiedene Löschmöglichkeiten von Bränden stehen heute bereits zur Verfügung. Nach derzeitigem Kenntnisstand führt das Abstellen von E-Pkw in Garagen oder auf Fahren nicht dazu, dass das Risiko im Vergleich zu den ohnehin vorhandenen Gefahren erheblich ansteigt.

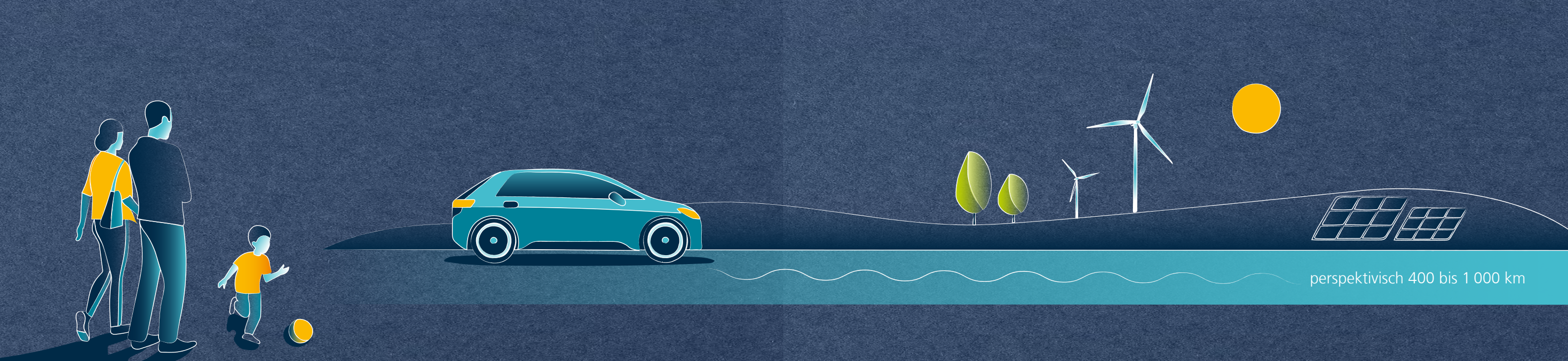
→ **Mehr Info auf Seite 30**

14

Wer möchte E-Autos und wie stabil ist das Interesse an der Elektromobilität?

Das Interesse an Elektroautos in der deutschen Bevölkerung blieb zwischen 2020 und 2024 stabil, auch wenn aktuell die Verbrauchszahlen sinken (vergleiche Frage 01). Rund ein Drittel der Befragten haben eine positive Einstellung zur Technologie. Die Gruppe der E-Auto-Nutzer:innen hat sich durch einen steigenden Frauenanteil diversifiziert, jedoch sind E-Pkw weiterhin vorwiegend unter höher gebildeten und besser verdienenden Personen verbreitet. Wichtige Rahmenbedingungen wie Kaufprämien und Ladeinfrastruktur beeinflussen die Verkaufszahlen und die gesellschaftliche Akzeptanz. Zudem wirkt sich eine positive Medienberichterstattung günstig auf die Einstellungen aus, während Widersprüche in der vergleichenden Bewertung von Antriebstechnologien Unsicherheiten verstärken können.

→ **Mehr Info auf Seite 31**



Einleitung

Im Jahr 2020 hat das Fraunhofer ISI den Policy Brief »Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf« veröffentlicht, der vielfach zitiert wurde.

Hintergrund

In den letzten fünf Jahren haben sich die Themen jedoch weiterentwickelt. Deshalb haben wir uns entschieden, ein Update des Policy Briefs zu erstellen, in dem einzelne Themenblöcke aktualisiert sind und die neuen Themen rund um Batterien für die Elektromobilität aufgreifen.

Der Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen für die Menschheit. Der neue IPCC-Bericht [1] schlägt deutlich Alarm: Menschliche Aktivitäten, hauptsächlich durch die Emission von Treibhausgasen, haben eindeutig eine globale Erwärmung verursacht, wobei die globale Oberflächentemperatur im Zeitraum 2011–2020 um 1,1 °C über dem Wert von 1850–1900 liegt. Der vom Menschen verursachte Klimawandel ist bereits für viele Wetter- und Klimaextreme in allen Weltregionen verantwortlich. Dies hat zu weitverbreiteten nachteiligen Auswirkungen und damit verbundenen Verlusten und Schäden für Natur und Menschen geführt (siehe [1]).

Nach der International Energy Agency (IEA) führte im Jahr 2022 der Wiederanstieg des Personen- und Frachtverkehrs nach der Coronavirus-Pandemie zu einem Anstieg der CO₂-Emissionen

im Verkehr um drei Prozent gegenüber dem Vorjahr. Die Verkehrsemissionen stiegen von 1990 bis 2022 mit einer durchschnittlichen jährlichen Rate von 1,7 Prozent schneller an als in allen anderen Endverbrauchssektoren mit Ausnahme der Industrie. Um das Szenario Netto-Null-Emissionen der IEA bis 2050 zu erreichen, müssen die CO₂-Emissionen des Verkehrssektors bis 2030 um mehr als drei Prozent pro Jahr sinken. Um diese Emissionsreduzierung zu erreichen, sind strenge Vorschriften und wirtschaftliche Anreize sowie erhebliche Investitionen in die Infrastruktur erforderlich, um den Betrieb emissionsarmer und emissionsfreier Fahrzeuge zu ermöglichen [2].

In Wissenschaft und Industrie gibt es mittlerweile einen breiten Konsens: Elektro-PKW sind die wichtigste Antriebstechnologie der Zukunft zur Senkung der Treibhausgasemissionen und Batterien sind der Schlüssel dazu. In den vergangenen Jahren war bereits ein deutlicher Anstieg in den Verkaufszahlen weltweit zu beobachten, der sich nach derzeitigen Trends weiter fortsetzen wird. Auch andere Kraftstoffe und Antriebstechnologien, wie beispielsweise synthetische Kraftstoffe im internationalen Flug- und Schiffsverkehr werden künftig eine Rolle spielen.

Trotz der deutlichen weltweiten Markterfolge wird heute in Deutschland noch bei vielen Käufer:innen sowie in Teilen der Öffentlichkeit und den Medien, der Politik, von Entscheider:innen in Unternehmen und der Fachwelt die Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit, Praxistauglichkeit und technologische Reife der Batterietechnologie und der E-Mobilität insgesamt in Frage gestellt. Gleichzeitig ist der Markthochlauf von batteriegetriebenen Pkw ein fester Bestandteil der nationalen und europäischen Mobilitätstransformation und in einschlägigen Empfehlungen nationaler und internationaler Studien (siehe zum Beispiel [3], [4] und [115]) sowie Politikzielen ein zentraler Baustein einer klimaneutralen Transformation in vielen Ländern (vergleiche [4]).

Vor diesem Hintergrund ist es erneut notwendig, einen wissenschaftlich-analytischen Blick auf die Entwicklungen, Potenziale und Hindernisse bezüglich eines Markthochlaufes batteriegetriebener PKWs zu werfen und Handlungsempfehlungen zu aktualisieren. Diese sollen dem politischen Ziel eines Hochlaufes, der sozial verträglich, ökologisch sinnvoll und ökonomisch für Deutschland und Europa vorteilhaft ist, dienen. In diesem Kontext nehmen die folgenden Fragen aus einer wissenschaftlichen Perspektive heraus einen Faktencheck für Batterien im E-Pkw-Bereich sowie die Elektromobilität an sich vor und zeigen die sich daraus ableitenden notwendigen Handlungsfelder auf. Der vorliegende Policy Brief wendet sich gleichermaßen an Politik, Fachwelt und Öffentlichkeit und fasst mit dem Fokus auf »Batterien für Elektroautos« den Wissensstand und die aktuellen Erkenntnisse zusammen.

Vorgehen und Methodik

Im Faktencheck werden vierzehn Fragen entlang der Batterie-Wertschöpfungskette, von der Rohstoffgewinnung, Material-/Komponentenherstellung, Batteriezell-, Modul-, Packproduktion über die Nutzung im Fahrzeug bis hin zur Kreislaufführung aus einer deutschen Perspektive diskutiert. Zur Beantwortung dieser Fragen werden relevante Studien und Artikel sowie teilweise eigene

wissenschaftliche Analysen des Fraunhofer ISI nebeneinander gestellt und ausgewertet.

Kernaussagen

Betrachtet man die zentralen Fragen entlang der gesamten Batterie-Wertschöpfungskette, so zeigt sich: Der weiter voranschreitenden Marktdiffusion batterieelektrischer Pkw, die bei fortschreitendem Klimaschutz weltweit wahrscheinlich nach 2030 bereits die Mehrzahl an neuverkauften Fahrzeugen darstellen wird, stehen keine grundsätzlichen Hürden mehr entgegen. Viele der technischen Hürden wurden in den letzten Jahren gelöst und hier schreitet vieles weiter schnell voran. In Deutschland bestehen allerdings noch wirtschaftliche Herausforderungen wie günstigere Verbrenner-Fahrzeuge und unzureichende staatliche Anreize. Auch die deutsche Automobilindustrie steht gerade unter starkem internationalen Wettbewerbsdruck. Elektrofahrzeuge sind in der Gesamtbilanz bei Treibhausgasen in der Regel heute schon deutlich besser als konventionelle Verbrennerfahrzeuge, aber die Umweltbilanz gilt es weiter zu verbessern, etwa durch entsprechende Regulierung. Die Akzeptanz für Elektrofahrzeuge ist noch unzureichend und hierfür ist weitere Aufklärungsarbeit notwendig.

Die Fragen im Detail

Im Folgenden beantworten wir die vierzehn Fragen entlang der Batterie-Wertschöpfungskette ausführlicher. Dazu haben wir relevante Studien und Artikel sowie teilweise eigene wissenschaftliche Analysen nebeneinander gestellt und ausgewertet.

01

Wie entwickelt sich die Elektromobilität und die Batterienachfrage weltweit und in Deutschland?

Aktuell steigt der Absatz von Elektroautos – darunter fallen reine Batteriefahrzeuge (BEV) wie auch Plug-in-Hybride (PHEV) – weltweit weiter an und könnte im Jahr 2024 rund 17 Millionen erreichen [3]. Dies entspricht mehr als einem von fünf weltweit verkauften Pkw. Im Jahr 2024 könnte der Marktanteil von Elektroautos bei bis zu 45 Prozent in China, 25 Prozent in Europa und über 11 Prozent in den Vereinigten Staaten liegen, was durch den Wettbewerb zwischen den Herstellern, sinkende Batterie- und Fahrzeugpreise und die anhaltende politische Unterstützung begünstigt wird (siehe [3]).

Es ist weiterhin klar, dass sich zur Einhaltung von ambitionierten Klimaschutzziele dieser Trend fortsetzen muss. Ihr weltweiter Anteil kann auf 40 Prozent an Neufahrzeugen bis 2030 und mehr als 50 Prozent in 2035 steigen, unter anderem getrieben von günstigen Fahrzeugen aus China. Wird das Ziel der Null-Treibhausgasemissionen bis 2050 unterstellt, wächst der Anteil in 2035 sogar auf 90 Prozent an (siehe [5]).

Bis 2022 sind auch in Deutschland die Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen deutlich angestiegen bis auf 30 Prozent [6, 3]. Doch in 2024 sind die Zahlen zurückgegangen (23 Prozent, insbesondere verursacht durch einen Rückgang bei den reinen Batteriefahrzeugen) [7]. Auch der europäische Markt schwächt und zeigt einen Rückgang der E-Pkw Marktanteile um drei Prozent [8]. Somit verliert Europa und im Besonderen Deutschland seine Dynamik.

Die deutsche Entwicklung hat mehrere Gründe: Die Ende 2023 ausgelaufene Förderung der Kaufpreise, die vergleichsweise hohen Anschaffungsausgaben (die deutlich über den Preisen in China liegen), die durch den Ukrainekrieg gestiegenen Strompreise (auch wenn sie aktuell wieder deutlich gesunken sind),

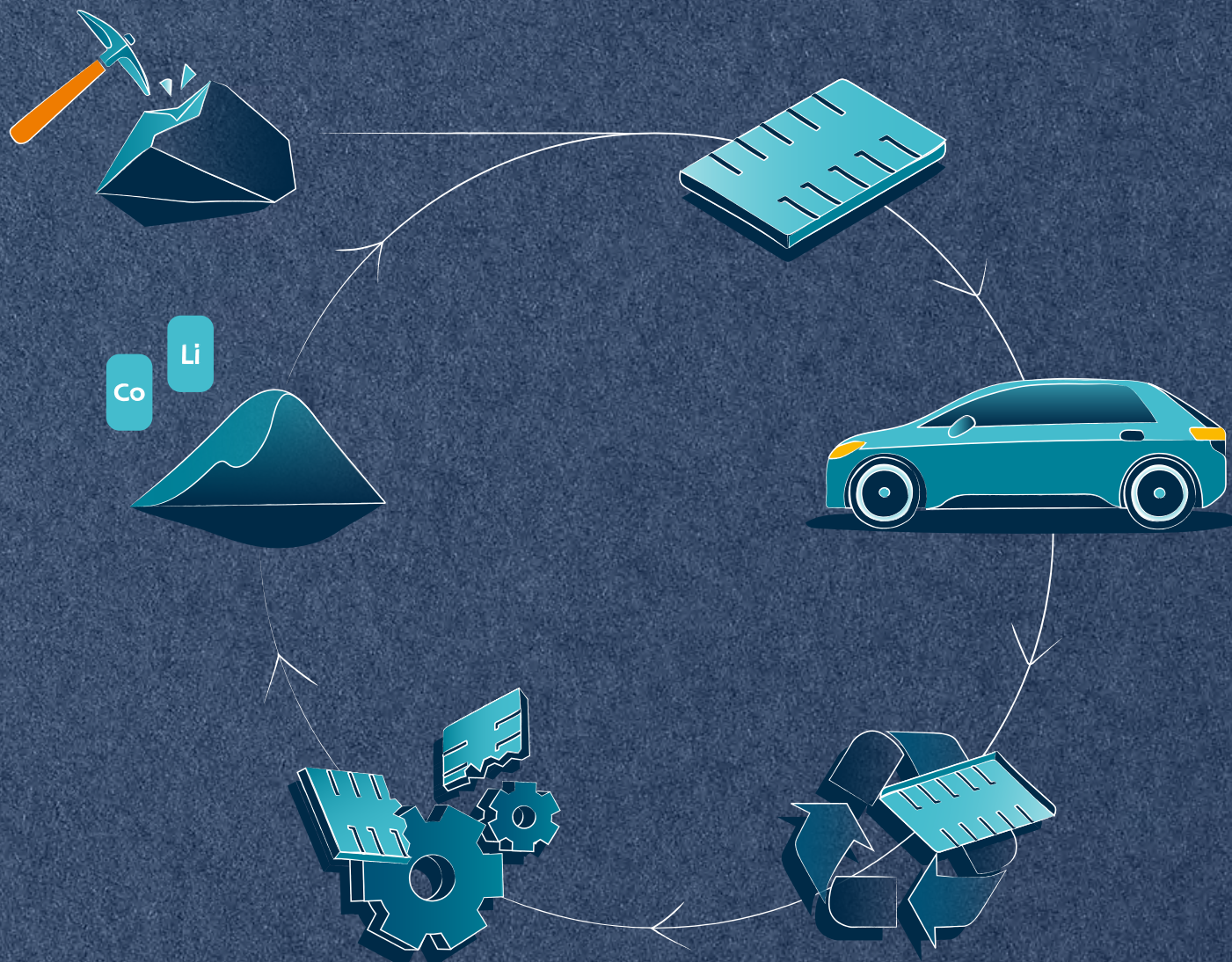
die vergleichsweise günstigen Benzin- und Dieselpreise, die Diskussionen um mangelnde Ladeinfrastruktur (die aber im internationalen Vergleich in Deutschland gut ist) und die schwache gesamtwirtschaftliche Entwicklung. Weiterhin könnte die Diskussion um synthetische Kraftstoffe (die auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellt werden) und in besonderem Maße die Diskussion um Technologieoffenheit die Marktteilnehmenden eher verunsichert und zur Kaufzurückhaltung geführt haben.

Ob sich kurzfristig wieder eine Trendumkehr einstellen wird, unter anderem aufgrund der EU-CO₂-Flottengrenzwerte, die 2025 einzuhalten sind, und kommenden neuen günstigeren Modellangeboten, wird sich zeigen [7]. Bei Berücksichtigung der aktuellen Marktentwicklung erscheint das gesetzte politische Ziel von 15 Millionen Elektrofahrzeugen im Bestand in Deutschland bis 2030 kaum mehr erreichbar [9], was zu einer Zielverfehlung der Treibhausgasminderungsziele in Deutschland beitragen kann [10]. Die aktuell in der EU geltenden Rahmenbedingungen mit einem Verbot von fossil angetriebenen Neufahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ab 2035 sowie den verschiedenen Ankündigungen internationaler Automobilhersteller mit teilweise ambitionierten Verkaufszielen für E-Pkw zeichnen ein leicht positives Bild.

Festzustellen ist auch, dass die deutschen Automobilhersteller (OEM) im internationalen Vergleich im letzten Jahr an Marktanteilen bei E-Pkw verloren haben (siehe Abbildung 1). Dies ist für eine der wichtigsten Branchen in Deutschland ein Warnsignal.

In Abbildung 2 werden die benötigten Batteriekapazitäten für zwei Szenarien der Marktdurchdringung von E-Pkw berechnet, die mit den weiter oben genannten Zahlen des Marktwachstums für E-Pkw korrelieren.

Man erkennt die deutliche steigende Nachfrage nach Batteriekapazitäten, im Wesentlichen getrieben von der Nachfrage in China. Europa trägt rund 20 Prozent zur weltweiten Nachfrage bei. Laut Prognose könnten Anwendungen für den Straßenverkehr im Jahr 2030 rund 85 bis 90 Prozent der Nachfrage



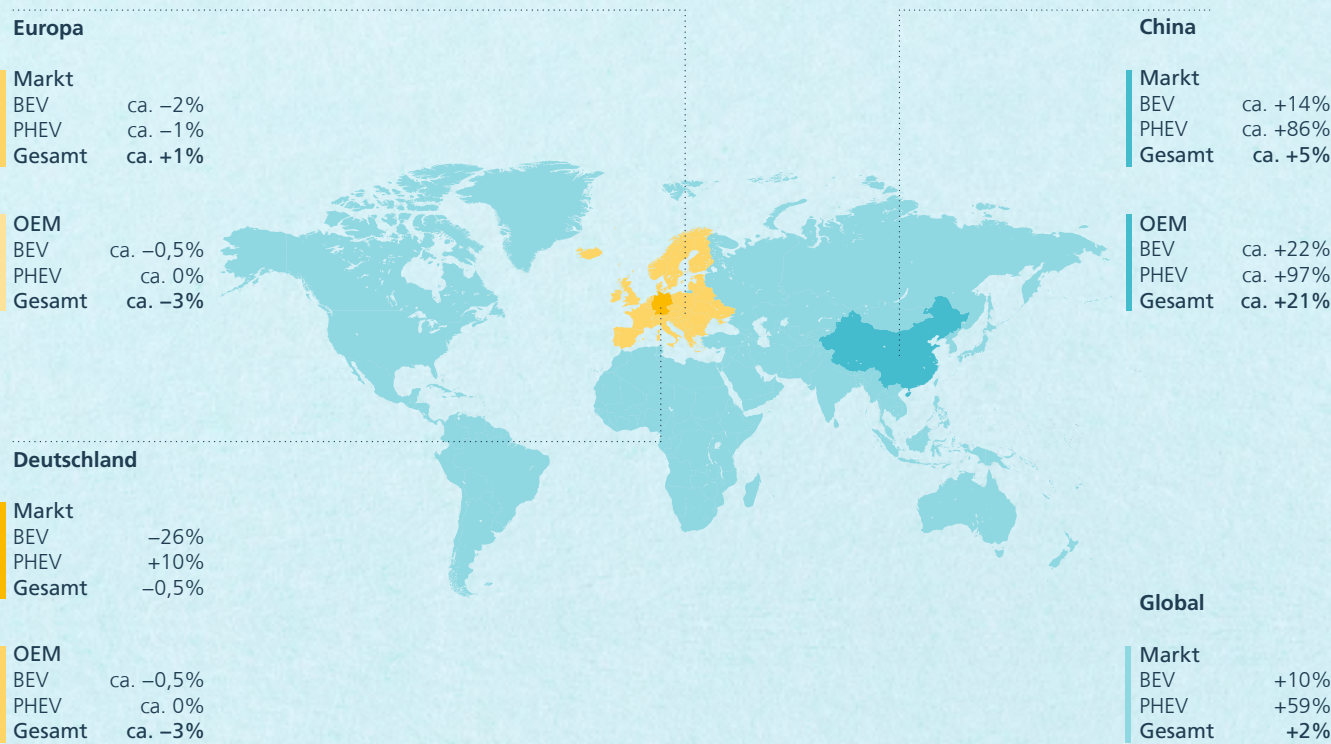


Abbildung 1 Vergleich der Entwicklung der Zulassungszahlen von E-Pkw sowie des gesamten Pkw-Marktes von 2023 (Januar–November) und 2024 (Januar–November) für die nationalen Märkte sowie die nationalen Automobilhersteller (OEM) zu ihrem weltweiten Absatz im Vorjahr. Quelle: eigene Auswertung

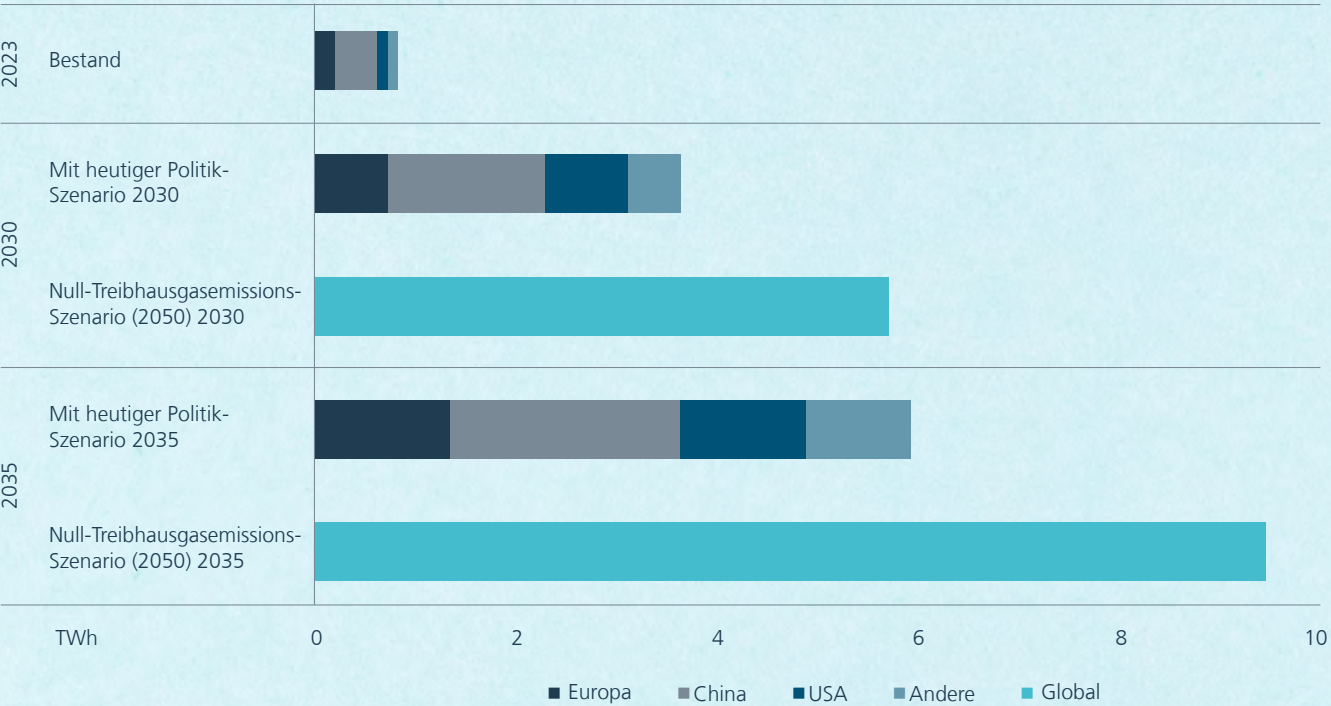


Abbildung 2 Entwicklung der Nachfrage nach Batteriekapazitäten nach Regionen und für zwei Szenarien (Zahlen aus [3])

ausmachen. Das heißt, sie liegen weit über der prognostizierten Nachfrage nach stationären und anderen Anwendungen.

02

Sind E-Fahrzeuge in Deutschland wirtschaftlich?

Betrachtet man die Vollkosten (Total Cost of Ownership, TCO) von konventionellen und batteriebetriebenen Fahrzeugen (BEV, Battery Electric Vehicle), sind heute schon bei durchschnittlichen Fahrleistungen im Mittelklassesegment ähnliche Kilometerkosten zu verzeichnen. Die derzeit noch höheren Anschaffungskosten werden durch die geringeren laufenden Kosten ausgeglichen. Dies betrifft einerseits die geringeren Energie-trägerkosten aufgrund des effizienteren Antriebsstrangs. Zum anderen sind auch die Wartungs- und Instandhaltungskosten faktisch niedriger als die von Verbrennern [11]. Dies ist insbesondere auf wegfallende verschleißintensive Motor- und Getriebe-bauteile [12] zurückzuführen. Im Vergleich dazu sind die Verschleißkosten für Reifen etwas höher aufgrund des höheren Gewichts, was jedoch die Gesamtkosten nicht über die eines Verbrenners hebt. Aktuell sind die Wartungs- und Instandhaltungskosten aufgrund der geringen Erfahrungswerte und des geringen Angebots an Werkstätten, die Elektrofahrzeuge warten und instandhalten, noch vergleichsweise hoch [13]. Bei der Wirtschaftlichkeit spielt zusätzlich der Zugang zu Ladeinfrastruktur eine wichtige Rolle. Ist diese privat oder am Arbeitsplatz vorhanden, dann können E-Fahrzeuge bereits nach drei Jahren Haltedauer wirtschaftlicher sein als vergleichbare Verbrenner [14]. Künftig wird sich die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen gegenüber konventionellen Verbrennern unter anderem aufgrund sinkender Fahrzeugpreise, verbesserter und günstiger Fahrzeugbatterien (vergleiche Frage 04) sowie der Nutzung von gesteuerten und bidirektionalen Laden (vergleiche Frage 11) noch weiter verbessern.

Ein Hindernis sind aber derzeit noch die höheren Anschaffungspreise der Fahrzeuge, die für viele Käufer kaufentscheidend sind, insbesondere weil sie nicht auf die Vollkosten schauen. Vergleicht man diese mit denen vergleichbarer diesel- oder benzinbetriebener Pkw, so sind E-Fahrzeuge in Deutschland und vielen anderen Ländern noch teurer [15, 16, 17, 18, 19] als vergleichbare Verbrenner. Die höheren Anschaffungskosten sind auf die verhältnismäßig hohen Kosten der Traktionsbatterie zurückzuführen. Allerdings lässt sich nach dem Auslaufen des Umweltbonus Ende 2023 in Deutschland beobachten, dass viele Hersteller von E-Fahrzeugen mit Preissenkungen auf die sich seither auf einem niedrigen Niveau von 13 Prozent einpendelnden Anteile der E-Fahrzeuge an den Neuzulassungen in Deutschland reagieren (vergleiche Frage 01). Die zu beobachtenden Preissenkungen sind dabei das Ergebnis aus einer

Überproduktion an Batterien in China, stark sinkenden Preisen für Zellen, der Kaufzurückhaltung auf dem deutschen Markt sowie den 2025 in der EU zu erreichenden CO₂-Flottengrenz-werten für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge. Nach Analysen von Bloomberg [20] sind die Preise für Lithium-Eisenphosphat (LFP)- und Nickel-Mangan-Cobalt (NMC)-Batteriezellen seit Anfang 2023 durch die entspanntere Rohstoffsituation von 151 USD/kWh wieder auf unter 100 USD/kWh und teils gar auf 75 USD/kWh gesunken. Neue Batterietechnologien und Produktions-verfahren bieten weitere Kostensenkungspotenziale (vergleiche Fragen 04 und 06). Allerdings gibt es auch Preisrisiken gerade bei Rohstoffen, Lieferketten und Batterien (vergleiche Fragen 05, 06 und 07). Da bei den Kaufentscheidungen von Privat-kunden üblicherweise die Anschaffungspreise und weniger die Gesamtkosten berücksichtigt werden, sollten die Gesamtkostenvorteile der E-Pkw stärker betont werden. Auch bei der Aus-gestaltung von Anreizsystemen sollte dies Berücksichtigung finden.

Ein zusätzlicher Faktor bei möglichen weiteren Preissenkungen von E-Fahrzeugen im Jahr 2025 spielen die bis Ende 2025 in der EU zu erreichenden CO₂-Flottengrenzwerte. Nach einer Studie des ICCT [119] müssen die Hersteller durchschnittlich einen E-Fahrzeug-Anteil von 28 Prozent an den gesamten Neu-zulassungen erreichen, um Strafzahlungen zu vermeiden. Die in früheren Studien zwischen 2025 und 2030 prognostizierte Preisparität von E-Fahrzeugen und Verbrennern [120, 121, 122, 123] scheint damit in naher Zukunft möglich zu werden.

Neben den Anschaffungskosten sind Reichweite und der Zugang zu (Schnell-)Ladeinfrastruktur für viele Käufer in ihrer Kaufentscheidung relevant. Während die Batteriekosten pro kWh noch weiterhin sinken werden, haben jedoch die durch-schnittlichen Batteriekapazitäten von E-Fahrzeugen in der Ver-gangenheit weiter zugenommen [21], um höhere Reichweiten und damit eine höhere Alltagstauglichkeit und Akzeptanz zu ermöglichen. Allerdings zeigt die Trendentwicklung, dass die Tendenz zu immer größeren Batteriekapazitäten abnimmt (siehe Frage 09).

Es gibt weiterhin auch Tendenzen, dass die Reichweitenverbes-erung eher über eine Effizienzverbesserung im Antriebsstrang vonstatten gehen wird [12]. Auch das Schnellladen nach einer langen zurückgelegten Teilstrecke kann die effektive Reichweite des Fahrzeugs deutlich erhöhen.

Verschiedene Institutionen bieten auch Vergleichsrechner zur Wirtschaftlichkeit an (siehe zum Beispiel [22]).

03

Ist die Umweltbilanz von E-Pkw besser als bei konventionellen Pkw?

Der wesentliche Treiber für E-Pkw ist die Senkung der Treibhausgasemission. Die Herstellung von reinen Batteriefahrzeugen ist im Vergleich zu konventionellen Pkw aufgrund der Produktionsprozesse für die Batterie deutlich energieintensiver. Je nach Energiequelle, Energieeffizienz der Produktion und der Batteriegröße fallen zwischen 60 und 130 Prozent höhere Treibhausgasemissionen an als bei der Herstellung von Benzin- oder Dieselfahrzeugen. In der Nutzungsphase verursacht ein BEV allerdings in Abhängigkeit des verwendeten Stroms weniger Treibhausgase. Unterstellt man den deutschen Strommix und nimmt an, dass die Energiewende wie geplant verläuft, das heißt unter anderem der Anteil der Erneuerbaren weiter zunimmt, dann weist ein heute angeschafftes BEV in der Gesamtbilanz von Herstellungs-, Nutzungs- und Verwertungsphase über seine Lebensdauer 40 bis 50 Prozent niedrigere Treibhausgasemissionen gegenüber einem vergleichbaren modernen, konventionellen Pkw bei durchschnittlicher Fahrleistung für einen Mittelklasse-Pkw auf (siehe die Studienlage in [3, 23, 24, 25, 26, 27]. Dies wird sich mit Vorschreiten der Energiewende künftig weiter verbessern. Wird überwiegend oder ausschließlich erneuerbarer Strom zum Laden verwendet – und in Deutschland haben derzeit knapp 50 Prozent der E-Fahrzeugnutzer eine eigene PV-Anlage sowie davon wiederum ein Drittel einen eigenen Batteriespeicher – fällt die Treibhausgasbilanz noch deutlich positiver aus [26, 25].

Einen weiteren Einfluss hat die Zeit, in der geladen wird. Üblicherweise sind niedrige Strompreise und ein hoher Anteil an erneuerbarer Stromproduktion positiv korreliert. Und E-Pkw kann man, da sie überwiegend stehen und oftmals ein Lade-punkt vorhanden ist, sehr gut gesteuert beladen (vergleiche Frage 09 und 11). Neben dem Laden mit Erneuerbaren Energien sollte künftig ein Schwerpunkt auf der Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Batterieproduktion liegen, wo es Potenziale gibt [29], auch durch neue Batterietechnologien (vergleiche Frage 04) und Recycling (vergleiche Frage 10). Auch eine Zweitnutzung der Batterie für stationäre Anwendungen, zum Beispiel zur Speicherung der Energie von PV-Anlagen, kann die Treibhausgasbilanz von E-Fahrzeugen weiter deutlich verbessern (vergleiche auch Frage 10).

Allerdings kann die Treibhausgasbilanz individuell stark unterschiedlich aussehen. Wird ein schweres, wenig effizientes E-Fahrzeug mit großer Batteriekapazität und geringer jährlicher Fahrleistung bilanziert, welches generell nur mit dem derzeitigen deutschen Strommix lädt, so ist die Treibhausgasbilanz kaum besser gegenüber einem entsprechenden konventionellen Fahrzeug.

Neben Treibhausgasemissionen haben E-Pkw wie auch konventionelle Pkw weitere Umweltauswirkungen, die nicht nur während der Nutzung, sondern auch bei Rohstoffgewinnung, Herstellung und Entsorgung entstehen. Rohstoffgewinnung und Herstellung haben starken Einfluss auf die ökologische Gesamtbilanz der E-Pkw. Daher haben aktuell in Deutschland angeschaffte E-Pkw bei Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus im Vergleich zu konventionellen Pkw auch Nachteile mit Blick auf einige Umweltschutzbereiche. Dazu zählen Feinstaubemissionen, Versauerung (Emissionen von säurebildenden Gasen, die Ökosysteme an Land und im Wasser belasten) und Überdüngung (Emissionen von Nährstoffen wie Nitrat und Phosphat, die Ökosysteme gefährden) [27]. Bezüglich der Feinstaubemissionen wurden in letzter Zeit insbesondere jene durch den Reifenantrieb stärker thematisiert. Hier gibt es Entwicklungen in der Reifentechnologie, die den Abrieb deutlich reduzieren können, unter anderem auch getrieben durch gesetzliche Vorschriften.

Da jede Form des motorisierten Individualverkehrs hohe ökologische Auswirkungen im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln hat, muss sich neben alternativen Antrieben und Kraftstoffen insbesondere das Mobilitätsverhalten ändern, beispielsweise durch mehr Nutzung des ÖPNV, sowie die Automobilflotten und -fahrleistungen reduziert werden. Geeignete Ansätze dafür sind beispielsweise Anreizsysteme und eine innovative Stadt- und Infrastrukturplanung mit besonderer Berücksichtigung des ÖPNV [30].

04

Wie entwickelt sich die Leistungsfähigkeit von Batterien weiter?

Die Leistungsfähigkeit von Batterien drückt sich auf Fahrzeugebene zum Beispiel durch die Reichweite, die Schnellladefähigkeit, die Lebensdauer oder auch die Performance bei niedrigen Temperaturen aus. In der Vergangenheit stand in der Automobilbranche insbesondere die Reichweite und damit eine hohe Energiedichte von Batterien im Fokus, was zur Einführung von Batteriematerialien mit immer höherer spezifischer Kapazität geführt hat. In heutigen Elektroautos sind Batterien aller Formate (zylindrisch, prismatisch, Pouch) und aller wesentlichen Kathodenmaterialklassen (NCA, NMC, LFP) verbaut. Zur Erreichung höchster Energiedichten planen die Hersteller den Einsatz von Hoch-Nickel-NMC-Kathoden und von Silizium-Kohlenstoff-Anoden. Damit dürfte für konventionelle Zellen eine Erhöhung auf bis zu 350 Wh/kg beziehungsweise auf über 800 Wh/l [12] möglich sein (zum Beispiel durch Präliithierung von Anodenmaterialien). Eine ultimative Steigerung der Energiedichte wäre durch Lithium-Metall-Anoden denkbar (über 1.000 Wh/l beziehungsweise etwa 400 Wh/kg) [31]. Ihr Einsatz

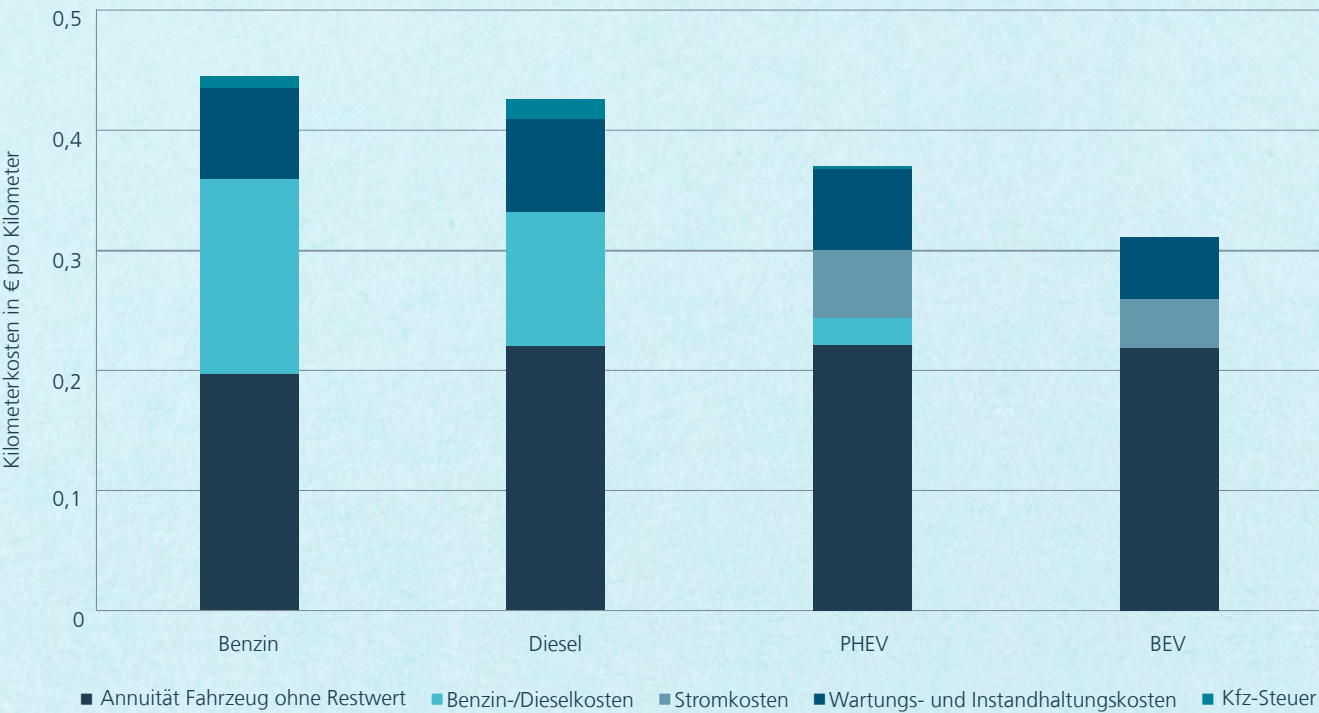


Abbildung 3 Vergleich der Wirtschaftlichkeit 2025 von konventionellen Mittelklasse-Pkw mit reinen batteriegetriebenen Fahrzeugen (BEV) und Plug-in-Hybriden (PHEV) (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [4])

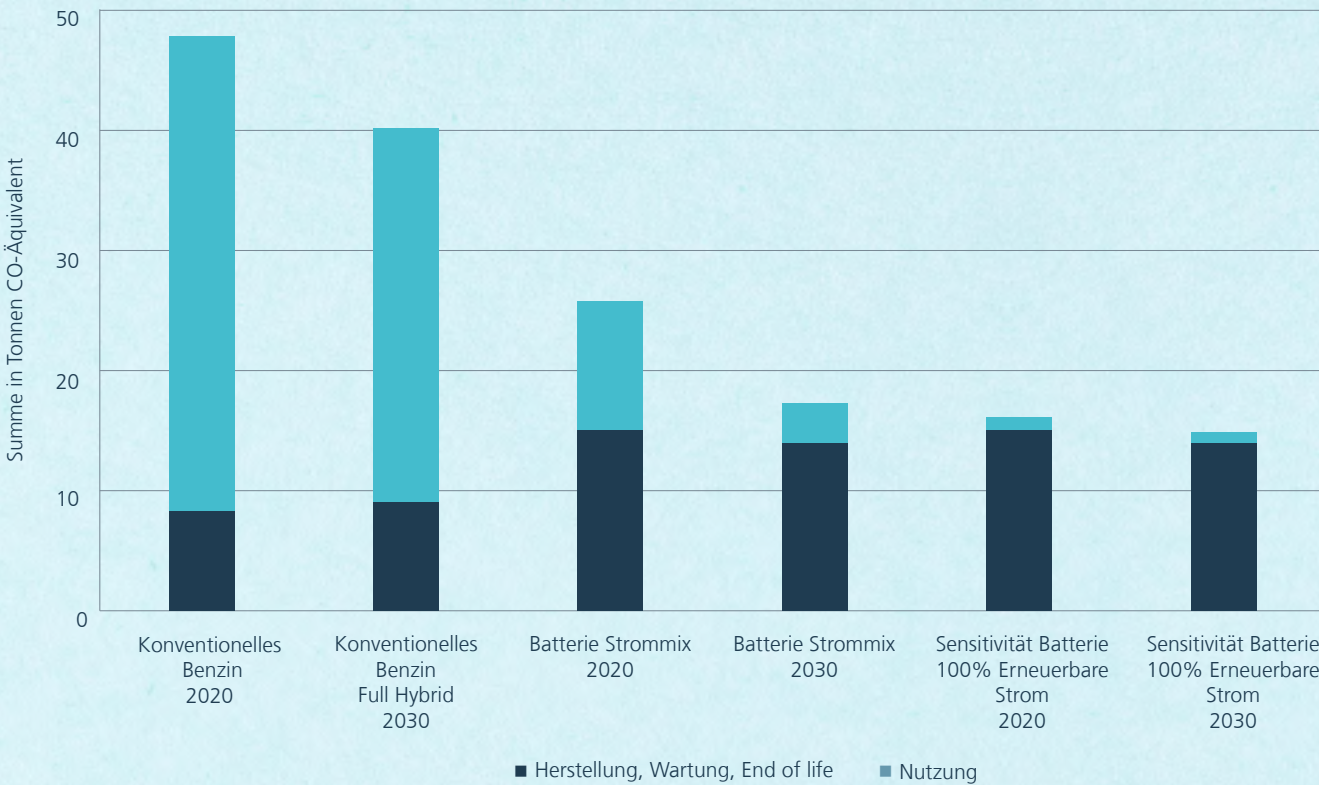


Abbildung 4 Treibhausgasemissionen von Batterie-PKW in Vergleich zu konventionellen PKW (Kompaktklasse) über den gesamten Lebenszyklus für Deutschland für PKW, die 2020 angeschafft wurden oder 2030 angeschafft werden [28]

könnte jedoch die Verwendung von Feststoffelektrolyten und damit von kommerziell bislang nicht verfügbaren Technologien erfordern. Feststoffbatterien werden heute von einer Vielzahl industrieller Akteure entwickelt. Stand 2024 können Feststoffbatterien in Kleinserien hergestellt werden und befinden sich in der Erprobungsphase durch die Automobilhersteller. Auf dem Weg zur industriellen Giga-Produktion dürften weiterhin große FuE-Anstrengungen notwendig sein. Das teilweise hohe Engagement wichtiger industrieller und wissenschaftlicher Akteure lässt darauf schließen, dass erste Feststoffbatterien in größerem Maßstab noch vor 2030 auf den Markt kommen könnten. Gegebenenfalls zunächst in Form sogenannter Semi-Feststoff-Konzepte, das heißt von Batterien, die eine Art Hybrid aus heutigen flüssigelektrolytbasierten und feststoffelektrolytbasierten Zellen darstellen.

Die Anforderungen der beschriebenen Hochenergiezellen und Feststoffzellen an das Batteriepack im Fahrzeug sind in Punkto Temperierung, Sicherheit und Management vergleichsweise hoch, weshalb sich beim Übergang von Zell- auf Packebene Verluste von 30 bis 40 Prozent bei der gravimetrischen Energiedichte ergeben [32]. Nicht nur aufgrund der wertvollen Materialien in den Batteriezellen sondern auch aufgrund des Integrationsaufwandes ins Fahrzeug macht dies die Hochenergiebatterien vergleichsweise teuer. Als zweites wichtiges Standbein in der Batterietechnologie haben sich daher günstige, Eisen-basierte LFP-Zellen etabliert. Diese besitzen zwar eine niedrigere Energiedichte als die Nickel-reichen Zellen, lassen sich jedoch aufgrund ihrer guten Sicherheitseigenschaften und hohen Robustheit mit deutlich weniger Aufwand ins Fahrzeug integrieren. Die Zwischenebene des Moduls entfällt und man spricht von sogenannten cell-to-pack-Batterien. Beim Übergang von Zell- auf Packebene betragen die Verluste lediglich 15 bis 30 Prozent bei der gravimetrischen Energiedichte. Auch diese alternative Variante von Batteriezellen wird weiterentwickelt, so verspricht die Substitution von Eisen mit ebenfalls günstigem Mangan die Steigerung der Energiedichte auf mehr als 200 Wh/kg gravimetrisch und mehr als 500 Wh/l volumetrisch (Vergleich LFP etwa >140 Wh/kg und >350 Wh/l).

Ein alternativer Ansatz gegenüber der Steigerung der Fahrzeugreichweite durch die Batterieenergiedichte ist die Entwicklung besonders schnellladefähiger Batterien. Typischerweise lassen sich heute verfügbare Fahrzeugmodelle in etwa 30 Minuten von 10 Prozent auf 80 Prozent nachladen. Neue Schnellladebatterien versprechen dies in nur zehn Minuten [33, 34] und dürften in den kommenden Jahren in Fahrzeugen auf den Markt kommen. Dies dürfte die Akzeptanz von E-Pkw weiter steigern.

Die beschriebenen Veränderungen bei der Chemie von Batterien wirken sich neben der Leistungsfähigkeit auch stark auf deren Kosten aus. Ein häufig zitiertes Beispiel ist die Reduktion des Anteils von teurem Cobalt in NMC-Batterien. Mit LFP-Batterien gibt es eine Technologie, deren Kosten zumindest aus der

Materialperspektive nur noch vom Preis für Lithium abhängt. Da Rohstoffpreise, gerade im Bereich der Batteriematerialien, hohen Schwankungen unterworfen sind, ist unklar, wie sich diese in den kommenden Jahren weiterentwickeln. Nach einer Phase besonders teurer Rohstoffe im Jahr 2022 befinden sich die Preise im Jahr 2024 auf einem sehr niedrigen Niveau. Lithiumcarbonat, ein wichtiges Batteriematerial, kostet zum Beispiel nur ein Fünftel so viel wie 2022. Wesentliche Einflussfaktoren für die Preisgestaltung ist das Verhältnis von Produktionskapazität zur Nachfrage und die Markterwartung für Elektrofahrzeuge für die nächsten Jahre. Dies gilt nicht nur für die Rohstoffe, sondern auch für die Batterieproduktion selbst. In den vergangenen Jahren wurden besonders in China große Material- und Zellproduktionskapazitäten aufgebaut, die heute nur teilweise abgerufen werden. Diese Überkapazitäten führen zu einem hohen Preisdruck. LFP-Batterien waren im Jahr 2024 für nur etwas mehr als 50 USD/kWh erhältlich [35]. Die Preise könnten wieder steigen, wenn sich das Verhältnis von Angebot und Nachfrage ausgleicht. Gleichzeitig wird aber auch kontinuierlich an der Verbesserung von Produktionsprozessen gearbeitet, um diese energieeffizienter und schneller zu machen und den Produktionsausschuss zu minimieren, was weiterhin günstig auf die Batteriepreise wirken dürfte.

Neben den beschriebenen Ansätzen zur Verbesserung Lithium-basierter Fahrzeugbatterien arbeitet die Forschung auch an anderen Chemien. Diese neuen Batterietechnologien sollten drop-in fähig sein und dürften sich in Masse nur durchsetzen, wenn sie in Kosten, Performanz und Nachhaltigkeit eine Verbesserung zu den genannten Technologien mit sich bringen. Dass es neben der Lithium-Ionen Batterie aber in der Tat vielversprechende Alternativen gibt, zeigt das Beispiel der Natrium-Ionen-Batterien, welche sich insbesondere für kleinere Fahrzeuge eignen. Zwar werden diese heute noch auf deutlich kleinerer Skala produziert, sie sind aber kommerziell verfügbar und werden in ersten Elektrofahrzeugen eingesetzt. Ihr Versprechen besteht insbesondere in günstigen Preisen und einem niedrigen ökologischen Fußabdruck durch die Substitution von Lithium mit dem hochverfügbaren Natrium. Weitere Batterietechnologien können in der fernerer Zukunft eine Rolle spielen und die Lithium-Ionen-Batterien sowohl in mobilen aber auch stationären Anwendungen ergänzen und so für mehr Vielfalt unter den Batterietechnologien sorgen [36].

05

Reichen die Rohstoffe global aus?

Der spezifische Materialbedarf hängt von der Zellchemie der Lithium-Ionen-Batterie (LIB) ab, wobei es große Unterschiede bei den verfügbaren Kathodenmaterialien gibt: (1)

Materialien mit Nickel, Kobalt und Mangan (NMC), (2) Materialien mit hohen Nickelanteilen und nur noch geringen Mengen an Mangan und Kobalt, sowie (3) Eisen- oder Mangan-basierten Kathodenmaterialien (vergleiche Frage 04). Der Markttrend geht weg von Kobalt-haltigen Kathoden und hin zu Materialien mit hohen Nickelanteilen sowie Eisen- oder Mangan-basierten Kathoden [37].

Abbildung 5 zeigt den Material-Fußabdruck für eine Standard-LIB mit 80 kWh, differenziert nach der Kathodenchemie. Daraus geht hervor, dass für LIB 7–10 kg Lithium und 56–84 kg Grafit benötigt werden, während der Einsatz von Kobalt, Nickel und Mangan je nach gewählter Chemie stark variiert.

Die erforderlichen Rohstoffe sind grundsätzlich weltweit verfügbar. Dies wurde in verschiedenen Studien vor mehr als einem Jahrzehnt bestätigt [38, 39, 40, 41]. Die grundlegende Einschätzung hat sich bis heute nicht geändert [42]. Die praktische Verfügbarkeit der Rohstoffe hängt von rechtzeitigen Investitionen und der geografischen Verteilung der nutzbaren Mineralvorkommen ab. Dies hat geopolitische sowie lokale Auswirkungen und erfordert strategische Entscheidungen auf der Grundlage wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Aspekte des Abbaus und der Verarbeitung der verschiedenen Materialien [43] (vergleiche Frage 12). Die EU stuft derzeit die meisten für LIB benötigten Rohstoffe als kritisch ein (Al, Co, Li, Naturgraphit, Phosphatgestein, Si, Mn) und/oder strategisch (Al, Co, Li, Mn, Cu, Ni).

Die steigende Nachfrage nach Batterien in Europa, die bis 2035 voraussichtlich zwischen 1,5 und 2 TWh pro Jahr liegen wird, dürfte die Gesamtnachfrage nach den wichtigen Rohstoffen deutlich erhöhen. Im Vergleich zu 2025 werden für die Batterieproduktion in Europa jährlich etwa fünfmal mehr Lithium und Nickel und etwa sechsmal mehr Grafit und Mangan benötigt werden [37, 44]. Dies, zusammen mit der zunehmenden europäischen Produktion von Batteriezellen im Vergleich zu Importen (Europa wird bis 2030 wahrscheinlich mindestens 50 Prozent seines Bedarfs an Batteriezellen durch lokale Produktion decken), wird eine umweltverträgliche, ethische und wettbewerbsfähige Rohstoffversorgung für die EU erfordern.

Angesichts der derzeitigen globalen Verteilung der Produktion und der aktuell bekannten Mineralvorkommen wird ein Großteil dieser Rohstoffe in der Zukunft in die EU importiert werden müssen, was zu verschiedenen Abhängigkeiten führt. Die Bestimmungen des Gesetzes über kritische Rohstoffe (Critical Raw Materials Act) [24] zielen darauf ab, den Anteil der inländischen Rohstoffbeschaffung für kritische und strategische Rohstoffe zu erhöhen, wozu sowohl der Bergbau als auch das Recycling beitragen sollen. In den nächsten Jahren wird aufgrund des schnellen Anstiegs der Batterienachfrage der größte Teil der Rohmaterialien aus Primärquellen (insbesondere aus dem Bergbau) bezogen werden müssen. Es sind in Europa erhebliche

Reserven an Lithium, Mangan und natürlichem Grafit verfügbar, doch primäres Kobalt und Nickel sind knapp. Abschätzungen über die Potenziale einer europäischen Eigenversorgung deuten auf Fortschritte beim Aufbau europäischer Wertschöpfungsketten (Bergbau- und Raffinerieanlagen) hin, doch die Anlaufphase muss extrem schnell erfolgen. Schlüssel-Herausforderungen dabei sind auch der Finanzierungsbedarf und die Akzeptanz für Bergbauprojekte in der EU.

Während Kobalt- und Nickel-Importe für die europäische Nachfragedeckung wahrscheinlich weiterhin notwendig bleiben, lassen sich Anteile von Lithium und der größte Teil von Mangan wahrscheinlich im Inland beziehen und raffinieren. Natürliches Grafit wird wahrscheinlich sowohl lokal bezogen als auch importiert werden müssen. Während die globale Diversifizierung des Bergbaus und der Raffinerien voraussichtlich auch die allgemeinen Abhängigkeitsrisiken reduziert, wird die geografische Konzentration auf einzelne Regionen in den meisten Fällen hoch bleiben, wobei insbesondere auch die Rolle Chinas über 2030 hinaus bedeutend sein wird [25, 26, 22].

Grundsätzlich können Kreislaufwirtschaft und Recycling dazu beitragen, Abhängigkeiten zu verringern und die Nachhaltigkeit innerhalb des Batterie-Ökosystems weiter zu verbessern, wodurch auch die Materialverfügbarkeit über das Jahr 2050 hinaus gesichert wird [45, 46, 47]. In der Praxis deuten aktuelle Schätzungen der Batterierücklaufmengen stark darauf hin, dass die Batteriemengen für das Recycling (abgesehen von Produktionsabfällen) oder die Zweitnutzung/Umnutzung von Batterien bis Anfang der 2030er Jahre gering sein werden, aber bis 2040 stark ansteigen, sodass sich langfristig 10–30 Prozent des Lithium- und Nickel- sowie bis zu 50 Prozent des Kobaltbedarfs in Europa aus der Aufbereitung dieser Altbatterien decken ließe [48, 49]. Der Rest (>50 %) muss aus Primärquellen im europäischen In- und Ausland stammen.

Alternative Batterietechnologien wie Natrium-Ionen-Batterien haben andere Rohstoffanforderungen und sind deutlich weniger von kritischen und strategischen Rohstoffen abhängig. Diese befinden sich derzeit am Anfang einer großflächigen Kommerzialisierung [36].

06

Welche Faktoren sind für eine wettbewerbsfähige Zellfertigung wichtig?

Für eine wettbewerbsfähige Batteriezellfertigung sind verschiedene Faktoren entscheidend, die sowohl Investitionen und operative Kosten als auch technologisches Know-how, strategische Partnerschaften und politische Rahmenbedingungen betreffen.



Abbildung 5 Durchschnittliche Rohstoffbedarfe einer Lithium-Ionen-Batterie (Bruttokapazität: 80 kWh) für verschiedene Cluster an Batterie-chemien, in Kilogramm, ohne Bedarfe für Elektrolyte und Binder. [Eigene, gemittelte Berechnung gemäß Fraunhofer ISI eEV Datenbank]

Ein grundlegender Aspekt ist die Kapitalverfügbarkeit und die Geschwindigkeit, mit der Fabriken errichtet werden können. Hier können staatliche Subventionen eine entscheidende Rolle spielen, um den Bau neuer Anlagen zu beschleunigen und die hohen initialen Investitionen für Gebäude, Maschinen und Infrastruktur abzufedern. Ebenso wichtig ist die Optimierung der Betriebsausgaben, die unter anderem durch Energiekosten und Lohnkosten beeinflusst werden. Während niedrige Energiekosten in der Produktion entscheidend sind, wird die Bedeutung von Fachkräften zunehmend als Schlüsselfaktor erkannt. Ohne ausreichend spezialisierte Arbeitskräfte lässt sich keine effiziente Produktion gewährleisten, weshalb der Standort auch aus Sicht der Personalverfügbarkeit, andererseits natürlich auch aus Sicht der Lohnkosten attraktiv sein muss.

Ein weiterer wesentlicher Faktor ist die Schaffung verlässlicher Rahmenbedingungen entlang der Lieferkette. Der Zugang zu essenziellen Rohstoffen (vergleiche Frage 05) und Komponenten muss gesichert sein, da Engpässe oder unzuverlässige Lieferketten die Produktion gefährden und Kosten in die Höhe treiben können.

Auch die Technologie und das Design der Batteriezellen sind wettbewerbsrelevante Kriterien. Hierzu zählen eigene, exklusiv nutzbare Designs, die nicht durch Patente anderer Hersteller eingeschränkt sind. Exklusiv zugängliche Technologien bieten den Vorteil, dass keine Lizenzgebühren anfallen und die Hersteller über das marktübliche Niveau hinaus technologisch führende Produkte anbieten können. Ein weiteres Element ist die Vorketten-Technologie, die oft durch die enge Zusammenarbeit mit Materialherstellern entwickelt wird. Hierbei können Zellhersteller das Recht an spezifischen Materialentwicklungen besitzen und damit ihre Position stärken. Wird hingegen nur auf Materialien zurückgegriffen, die über den Weltmarkt verfügbar sind, so bleibt das Technologiedesign häufig auf dem Stand der Technik – was in einem dynamischen Markt schnell als veraltet gelten kann. Ein eigenständiges F&E-Netzwerk in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern ist daher entscheidend, um innovative, exklusive Lösungen anbieten zu können.

Neben dem Design ist auch die Beherrschung der Herstellungsprozesse ein wichtiger Wettbewerbsfaktor, da ansonsten hohe Kosten durch Produktionsausschüsse entstehen können. Effiziente Produktionsprozesse, die durch spezifisches Know-how entwickelt wurden, sind oft ein Alleinstellungsmerkmal und entscheidend für die Produktqualität und Kosteneffizienz. Dieses Wissen kann entweder durch die interne Expertise aufgebaut oder über spezialisierte Fachkräfte eingekauft werden. Auch jenseits der aktuellen Zell- und Anlagentechnologie muss heute bereits an der nächsten Generation gearbeitet werden. Für die Wettbewerbsfähigkeit eines Standortes ist damit der Zugang zu F&E-Partnern aus Industrie und Forschung enorm wichtig.

In Europa bauen sowohl europäische Unternehmen als auch etablierte asiatische Unternehmen Produktionskapazitäten für Batteriezellen auf. Für beide Akteursgruppen gibt es gemeinsame, aber auch differenzierende Wettbewerbsfaktoren. So gelten beispielsweise Energiekosten, Importzölle auf Komponenten wie Kathodenmaterialien oder staatliche Unterstützungsmechanismen wie der EU Innovation Fund oder das Temporary Crisis and Transition Framework oft unabhängig von der Herkunft des Unternehmens. Hier steht Europa als Standort aktuell insbesondere in Konkurrenz mit den USA, beziehungsweise Ländern, die aufgrund von Freihandelsabkommen mit den USA ebenfalls von der Förderung durch den Inflation Reduction Act (IRA) begünstigt sind. Dieser kommt einer Förderung der laufenden Ausgaben gleich und wird in den USA durch Zuschüsse zu Investitionen komplementiert. Auch nachfrageseitig wird der Aufbau und die Wettbewerbsfähigkeit der Batterieindustrie durch politische Entscheidungen beeinflusst, so zum Beispiel durch die Planungssicherheit was den Hochlauf der Elektromobilität und den Ausstieg aus dem Verbrennungsmotor angeht.

Im Vergleich zu China als Produktionsstandort besonders günstiger Batteriezellen liegen die Kosten für viele Vorprodukte wie auch für die Anlagentechnik in Europa aktuell deutlich höher. Dies gilt insbesondere für neue europäische Hersteller. Zwar kann mit asiatischen Zulieferern auf die gleiche Technologie zurückgegriffen werden, Installations- und Inbetriebnahmezeiten sowie Investitionsvolumina pro Produktionskapazität sind in Europa aber deutlich länger beziehungsweise höher. Dies liegt nur in Teilen an den Genehmigungsverfahren, darüber hinaus aber auch an fehlender Erfahrung europäischer Unternehmen mit dem Bau von Gigafabriken und an einer im Vergleich zur asiatischen Industriestruktur noch sehr jungen Verknüpfung von Zulieferern (Prozesstechnik, Infrastruktur) und Zellherstellern. So kranken einige europäische Projekte in 2024 noch an Hochlaufproblemen, die mit den Produktionsprozessen zusammenhängen und damit sowohl mit Prozessbeherrschung als auch mit der Prozesstechnik selbst. Hier besitzen asiatische Unternehmen aufgrund ihrer Netzwerke in den Heimatländern klare Vorteile.

Was die nächste Generation an Batterien (vergleiche Frage 04) angeht, so kann der Standort Europa durch eine starke Forschungsszene punkten. Dies bezieht sich jedoch eher auf die Grundlagen- und angewandte Forschung. Wichtige Schritte zur Kommerzialisierung neuer Technologien werden heute häufig zum Beispiel durch Start-ups außerhalb Europas getan (zum Beispiel Feststoffbatterien, Silizium-Anoden, siehe [12], [31]).

07

Gibt es Lieferengpässe und Risiken entlang der Wertschöpfungskette?

Die Nachfrage für Elektrofahrzeuge ist, wie in der vorangegangenen Frage 01 aufgezeigt wurde, bis 2023 stetig angestiegen. Der Rückgang der Verkaufszahlen 2024 in Europa beziehungsweise insbesondere in Deutschland lässt sich mit den bereits geschilderten Effekten begründen und ist nicht auf einen etwaigen Lieferengpass bei Elektrofahrzeugen oder hierzu vorgelagerter Komponenten wie der Batterie zurückzuführen. Eine Auswertung von Lieferzeiten für aktuelle Elektrofahrzeugmodelle unterstreicht dies: Diese haben sich in den vergangenen Jahren stetig verkürzt und liegen aktuell in Deutschland im Mittel bei 4,3 Monaten. Damit bewegen sie sich im Spektrum von herkömmlichen Verbrennern [50].

Dennoch stellt der Bezug von Traktionsbatterien für E-PKW, welche ca. 30 bis 40 Prozent der Fahrzeugkosten verursachen, insbesondere für europäische und nordamerikanische OEM eine große strategische Herausforderung dar. Derzeit übersteigt die Zellproduktionskapazität die Zellauffrage, sodass die durchschnittliche Auslastung der Fabriken im Verlauf der letzten Jahre gesunken ist und sehr wahrscheinlich auch in Zukunft 60 Prozent nicht übersteigen wird. Während sich hieraus Herausforderungen aus wirtschaftlicher Perspektive ergeben können, wird es wohl zu keinen strukturbedingten Kapazitätsengpässen kommen. Ebenso gibt es Überkapazitäten in der vorgelagerten Wertschöpfungsstufen, wie bei der Materialproduktion von Batteriekomponenten, insbesondere bei Anodenaktivmaterial [12]. Jedoch ist es beim Hochlauf der Produktionskapazitäten zu einer regionalen Entkopplung der Batterieproduktion und der Batterienachfrage gekommen. In Zukunft ist daher nicht von einem Lieferengpass aufgrund fehlender Produktionskapazitäten auszugehen, sondern vielmehr kann es zu einem eingeschränkten Zugriff auf die Lieferkette der Batterie kommen. China hat bei der Batterieproduktion mit über 70 Prozent den größten Marktanteil, gefolgt von Korea und Japan [51]. In China stechen zudem einzelne Unternehmen mit sehr großen Marktanteilen (zum Beispiel CATL oder BYD) heraus. Nicht nur die Zellproduktion selbst, sondern auch die entsprechende Zulieferindustrie der Ausgangsmaterialien für Batterien ist größtenteils in Asien beziehungsweise insbesondere in China angesiedelt [52]. Zudem findet die Rohmaterialaufbereitung für die wichtigsten Batterieaktivmaterialien, insbesondere von Lithium, Mangan, Cobalt und Graphit, primär in China statt [53]. Jüngste politische Ereignisse wie der Handelskonflikt zwischen den USA und China, aber auch der Ukrainekrieg mit den entsprechenden geopolitischen Auswirkungen, rückt die potenziellen Konsequenzen einer einseitigen Abhängigkeit in den Mittelpunkt und unterstreicht die Relevanz einer resilienten Lieferkette.

Als Handlungsrahmen spielen für europäische Hersteller neben dem potenziellen Aufbau einer eigenen Zellproduktion und damit einem direkten Zugriff auf die Lieferkette auch Multi-Sourcing Strategien eine wichtige Rolle. Vorteilhaft ist zusätzlich auch eine geografische Nähe zu Automobilherstellern, die den Zugriff grundlegend erleichtert und die Logistik vereinfacht. Eine Folge dieser Strategie war, dass insbesondere in den letzten Jahren eine Vielzahl an neuen Produktionsankündigungen in Europa stattgefunden hat.

Selbst unter Berücksichtigung einer mittelfristigen Abhängigkeit von importierten Batteriezellen aus Asien ist eine Versorgungsknappheit an Batterien in Europa jedoch eher unwahrscheinlich. Zukünftig wird die Abhängigkeit mehr und mehr durch eine europäische Zellproduktion reduziert. Unterstützt wird dies durch Verordnungen wie den Critical Raw Materials Act (CRMA) oder die Förderprogramme für den Aufbau einer europäischen Zellproduktion (IPCEI Förderprojekte). Die schwächelnde Marktnachfrage sorgt zwar für die Aufkündigung einzelner Bauvorhaben, es ist trotzdem davon auszugehen, dass sich eine Importabhängigkeit langfristig reduzieren lässt.

Eine vorgelagerte Zulieferindustrie könnte sich etwas zeitversetzt in Europa etablieren. Erste Standorte sind bereits angekündigt beziehungsweise im Aufbau. Neben dem Zugriff auf die Zellproduktion selbst sind Hersteller auch mehr und mehr um einen direkten Zugriff auf die Rohstoffe bemüht. Es gibt eine Vielzahl öffentlich angekündigter Abnahmeverträge von Fahrzeugherstellern mit verschiedenen Rohstoffproduzenten [54]. Auch dies trägt zur Robustheit der gesamten Lieferkette bei und erlaubt eine größere Kontrolle bei den Kosten für die Batteriezellen. Eine gänzliche Entkopplung Europas von den globalen Lieferketten ist jedoch vor dem Hintergrund der benötigten Mengen an Rohstoffen und Komponenten nicht realistisch.

Gestörte Teileproduktionen zu Beginn des Ukrainekrieg oder die Unterbrechung des Warenaustauschs bei der Havarie der Ever Given im Suezkanal zeigen jedoch immer wieder die Komplexität der globalen Lieferketten auf und verdeutlichen die Schwierigkeiten bei der Planbarkeit.

08

Welche Herausforderungen ergeben sich für den Arbeitsmarkt?

Die Herstellung eines batterieelektrischen E-Pkw ist durch die geringere Zahl an Komponenten weniger komplex und beschäftigungsintensiv als die eines konventionellen Pkw. Einer aktuellen Studie zufolge könnte etwa jeder vierte Arbeitsplatz in der Automobilindustrie wegfallen [Bertelsmann-Stiftung/Prognos

für VDA]. Darin heißt es, dass der Wegfall von 190.000 Arbeitsplätzen nicht gänzlich durch Generationswechsel und Umschulungs-/Weiterbildungsmaßnahmen kompensiert werden kann. Auch viele weitere Studien rechnen mit einem deutlichen Rückgang der Beschäftigung. Das Ergebnis wird dabei von mehreren Faktoren mitbestimmt: dem unterstellten Markthochlauf, den globalen Marktstrukturen und -anteilen, der geographischen Abgrenzung der Studie, den betrachteten Branchen und Lieferketten sowie der Berücksichtigung von Produktivitätseffekten. Entsprechend gilt es die Aussagen der Studien anhand dieser Kriterien zu interpretieren.

Ein besonderes Augenmerk ist auf die zugrunde gelegten Systemgrenzen zu richten, denn der Wandel hin zu Elektromobilität betrifft nicht nur die Beschäftigung in der Fahrzeugproduktion. Beispielsweise entstehen Stellen im Bereich der Energiewirtschaft, Ladeinfrastruktur oder Digitalisierung, die ebenfalls einen nennenswerten Effekt haben [55], [56], [57], [58].

Oftmals werden die Zellproduktion und die Herstellung des Batteriesystems als neuer Jobgenerator genannt. Die große Bedeutung der Batteriezellproduktion ergibt sich jedoch nicht aus den dort direkt entstehenden Arbeitsplätzen, sondern vielmehr aus ihrer Rolle als »Enabler« für die vorgelagerten Wertschöpfungsstufen und das gesamte Ökosystem Batterie. So werden in vielen Bereichen (zum Beispiel Batterierohstoffe, -komponenten, Ladeinfrastruktur sowie Ladesteuerung, Second-Life-Nutzung der Batterien, etc.) ganz neue Wertschöpfungsstrukturen und damit Arbeitsplätze entstehen.

Von zentraler Bedeutung ist, inwieweit sich die deutschen OEM ebenso wie Batteriehersteller und -zulieferer gegenüber der Konkurrenz aus insbesondere China durchsetzen können. Der Markt für Elektrofahrzeuge und deren Komponenten ist limitiert und so sind Standortfaktoren entscheidend dafür, wo Arbeitsplätze entstehen und wegfallen.

Ein wichtiger Standortfaktor ist das Humankapital. Vor 2010 gab es nur wenige hundert ausgebildete Batterieexpert:innen in Europa, aber diese Zahl ist auf 30.000 bis 40.000 angestiegen, wobei allein in Deutschland 15.000 ausgebildet wurden. Sie werden insbesondere in den Bereichen Forschung und Entwicklung und in der Produktion benötigt. In der gesamten EU-Industrie lag der Bedarf an entsprechenden Expert:innen in den letzten Jahren bei 40.000 bis 60.000, und es wird erwartet, dass diese Zahl bis 2030 auf rund 200.000 ansteigt. Es besteht die Gefahr, dass sich nur die Hälfte der benötigten Stellen besetzen lässt.

Wenn man die gesamte Wertschöpfungskette, einschließlich der Integration von Batteriesystemen in Elektroautos und anderen Anwendungen, sowie indirekte Beschäftigungseffekte berücksichtigt, könnten bis 2030 EU-weit bis zu 1,5 Millionen Arbeitsplätze mit der Batteriewertschöpfungskette verbunden sein.

Ein Großteil dieser Arbeitsplätze erfordert jedoch nicht unbedingt hochqualifizierte Batterieexpert:innen. Es handelt sich vielmehr um Mitarbeiter:innen in Bereichen wie Produktion, Service, Logistik und Verkauf, die in kürzerer Zeit von Batterieexpert:innen angelernt, weitergebildet oder umgeschult werden können. Wenn der Aufbau eines Batterie-Ökosystems in Europa erfolgreich ist, könnten damit langfristig vier bis fünf Millionen Arbeitsplätze verbunden sein. Auch für den Maschinen- und Anlagenbau ist eine heimische Zellproduktion von hoher Relevanz, um zum Beispiel Referenzen für den globalen Markt zu erlangen [59].

Ein potenzieller Mangel an Expert:innen und Fachkräften ist daher zweifach kritisch zu sehen: Erstens fehlen sie direkt, was die Standortattraktivität senkt und eine verminderte Produktivität nach sich zieht. Darüber hinaus wird der beschriebene Multiplikatoreffekt durch die Ausbildung weiterer Arbeitskräfte abgeschwächt.

Insgesamt kann die elektromobile Wertschöpfungskette einen Beitrag dazu leisten, die Auswirkungen des Strukturwandels und der Transformation im Automobilsektor zu dämpfen. Damit der heimische Arbeitsmarkt jedoch auch davon profitieren kann, gilt es diese Wertschöpfungskette auch in Deutschland aufzubauen. Aktuell ist jedoch aufgrund des schwächelnden heimischen Absatzes von Elektrofahrzeugen (vergleiche 01) die Verschiebung oder gar Annullierung vieler Projekte zu beobachten.

09

Welche Reichweiten sind zu erwarten und wie entwickelt sich die Ladeinfrastruktur?

Für potenzielle Käufer:innen sind Fahrzeugreichweite und die Verfügbarkeit von privater und öffentlicher Ladeinfrastruktur zwei zentrale Aspekte. Umfragen zeigen jedoch, dass beide nach der Anschaffung meist deutlich positiver wahrgenommen werden als zuvor [60]. Dennoch bleiben die Fahrzeugreichweite sowie die Ladeinfrastruktur weiterhin relevante Anschaffungskriterien.

Topmodelle besitzen heute mindestens 80 kWh nutzbare Batterie und ermöglichen damit nominale Reichweiten von mindestens 400 km [61]. Die reale Reichweite hängt vom individuellen Fahrverhalten ab und fällt meist etwas geringer aus. Mittelfristig haben Hersteller über 1000 km Reichweite, nicht zuletzt durch den Einsatz von Feststoffzellenbatterien, angekündigt. Mittelklassefahrzeuge (C-Segment) sind heute meist mit 45 kWh bis 75 kWh ausgestattet [62]. Die Spannbreite nahm zuletzt zu. Abbildung 6 zeigt die Entwicklung der Batteriekapazität je Fahrzeugsegment in den letzten Jahren. Die Größe der Batterie wird

zunehmend als Abwägung zwischen den Kosten einer größeren Batterie mit besseren Zellen und dem daraus resultierenden zusätzlichen Nutzen in Form einer erhöhten Reichweite getroffen [63]. Technische Beschränkungen werden zunehmend vernachlässigbar.

Es ist davon auszugehen, dass die Batteriegröße auch zukünftig weiter differenziert wird, um unterschiedliche Nutzungszwecke abzubilden und Entwicklungen bei den Batterietechnologien weitere Optionen eröffnen (vergleiche Frage 04). Die durchschnittliche Batteriegröße könnte dabei nur noch moderat ansteigen, insbesondere da Fahrer:innen eine Reichweite von 300 bis 400 km zu 95 Prozent als ausreichend einschätzen [64] und ökologische Aspekte vermehrt Beachtung finden (vergleiche Frage 02). Eine gut ausgebaute Ladeinfrastruktur ermöglicht die Nutzung kleinerer Batterien und ist eine wesentliche Voraussetzung für den Erfolg von Elektrofahrzeugen gerade für den Massenmarkt [65, 66].

Die meisten Ladevorgänge – 50 bis 75 Prozent – finden zuhause statt [63]. Rund drei Viertel der Fahrer:innen in Deutschland besitzen eine Garage oder einen privaten Stellplatz [60, 64, 65]. Circa die Hälfte der derzeitigen E-Fahrzeugnutzer:innen in Deutschland besitzt zusätzlich eine Solaranlage und profitiert von günstigen Ladekosten [60, 66, 67]. Das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) sieht vor, dass bei drohender Netzüberlastung private Ladesäulen durch den Netzbetreiber auf minimal 4,2 kW Leistung gedimmt werden dürfen. Die Nutzer:innen werden, unabhängig von einer tatsächlichen Abregelung, durch reduzierte Netzentgelte entschädigt. Eine finanzielle Förderung privater Ladeinfrastruktur ist nicht mehr notwendig – verbunden mit einer verpflichtenden Teilnahme am Lademanagement aber eventuell interessant. Gesteuertes Laden könnte das Verteilnetz entlasten, hohe Investitionen vermeiden und die Nutzung günstigen Stroms aus Erneuerbaren Energien erhöhen [68, 69] (siehe auch die Ausführungen in Frage 11 zum bidirektionalen Laden).

Das Laden am Arbeitsplatz stellt eine Option für Nutzer:innen ohne Heimlademöglichkeit dar und ermöglicht längere Pendelwege. Auch für die direkte Nutzung von Photovoltaikstrom ist Laden am Arbeitsplatz wichtig [67]. Ein wirtschaftlicher Vorteil kann dadurch entstehen, dass die gewerblichen Strompreise zum Teil deutlich unter denen von Haushalten liegen [68].

Nutzer:innen nehmen aktuell auch eine positive Entwicklung der öffentlichen Ladeinfrastruktur wahr [60]. Das Laden an öffentlichen Ladepunkten ist meist sofort möglich, nur selten sind alle Ladepunkte belegt. Öffentliche Ladeinfrastruktur kann ein Ersatz für fehlendes Heimpladen sein. Es ist zu erwarten, dass zukünftig mehr Nutzer:innen ohne eigenen Stellplatz auch auf öffentliche Ladepunkte angewiesen sind. Das Gebäude-Elektromobilitätsinfrastruktur-Gesetz (GEIG) setzt daher Rahmenbedingungen, um die Ladeinfrastruktur auch in Wohnanlagen und an öffentlichen Gebäuden – zum Beispiel

Supermärkten – auszubauen [69]. Während rechtliche Vorgaben im halböffentlichen Raum auch mit AC-Ladeinfrastruktur erfüllt werden können, setzen Supermarktbetreiber verstärkt auf Schnellladeinfrastruktur, die einen höheren Durchsatz und damit eine bessere Wirtschaftlichkeit verspricht [70, 71].

Schnellladeinfrastruktur wird in Deutschland jedoch vor allem für längere Fahrten gebraucht. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist bereits mit geringen Aufschlägen und Auslastungen von etwa zwei Stunden am Tag möglich [70]. Aktuell kommen in Deutschland auf einen der circa 30.000 Schnellladepunkte etwa 50 E-Pkw (BEV) [72]. Auch wenn jährlich mehrere tausend Schnellladepunkte ausgebaut werden, ist zukünftig von mehr Fahrzeugen je Ladepunkt auszugehen [73, 74], auch aufgrund höherer Reichweiten [75]. Der Ausbau von Schnellladeinfrastruktur sollte daher marktgetrieben erfolgen, um Kosteneffizienz zu wahren und keine Überkapazitäten zu schaffen. Bereits heute wird über 80 Prozent der öffentlichen Ladeinfrastruktur privatwirtschaftlich betrieben [72].

Neben der Vergrößerung des Infrastrukturnetzes liegt der Fokus auf der Erhöhung der Ladeleistung von 50 auf bis zu 350 kW, um die Ladezeiten von heute circa 30 Minuten (10–80 Prozent) weiter zu verkürzen. Mit steigenden Batteriekapazitäten und höheren Ladegeschwindigkeiten wird der Bedarf an Schnellladepunkten jedoch proportional abnehmen, was es bei der weiteren Ausbauplanung zu berücksichtigen gilt. Das öffentliche Laden mit niedrigen Leistungen wird langfristig, wie zuvor beschrieben, für Nutzer:innen ohne eigenen Stellplatz benötigt.

10

Was passiert mit den Altbatterien?

Der Umgang mit Altbatterien und wie deren Verwertung am Lebensende im Sinne des Recyclings erfolgen soll, ist Gegenstand der sogenannten »Batterie-Verordnung« (Verordnung (EU) 2023/1542). Sie regelt zentrale Aspekte wie Schaffung von Annahmestellen und -Prozessen, Sammelquoten, Recyclingeffizienzen in Bezug auf einzelne Materialien wie Kobalt oder auch die Verwendung von recycelten Materialien. Diese Verordnung hat zum Ziel, verbesserte Nachhaltigkeits-, Recycling- und Sicherheitsanforderungen einzuführen und die Verfügbarkeit von Rohstoffen in Europa zu verbessern. Dies ist insbesondere in Anbetracht des Markthochlaufs von Elektrofahrzeugen und dem dadurch bedingten zeitverzögerten Rücklauf an Altbatterien (10–15 Jahre) von hoher Bedeutung [76], [77].

Mit dem Hochlauf des Marktes für Elektrofahrzeuge (vergleiche Frage 01) nimmt auch das Batterierecycling in Europa weiter Fahrt auf [78]. Dieses Wachstum wird bis in die frühen

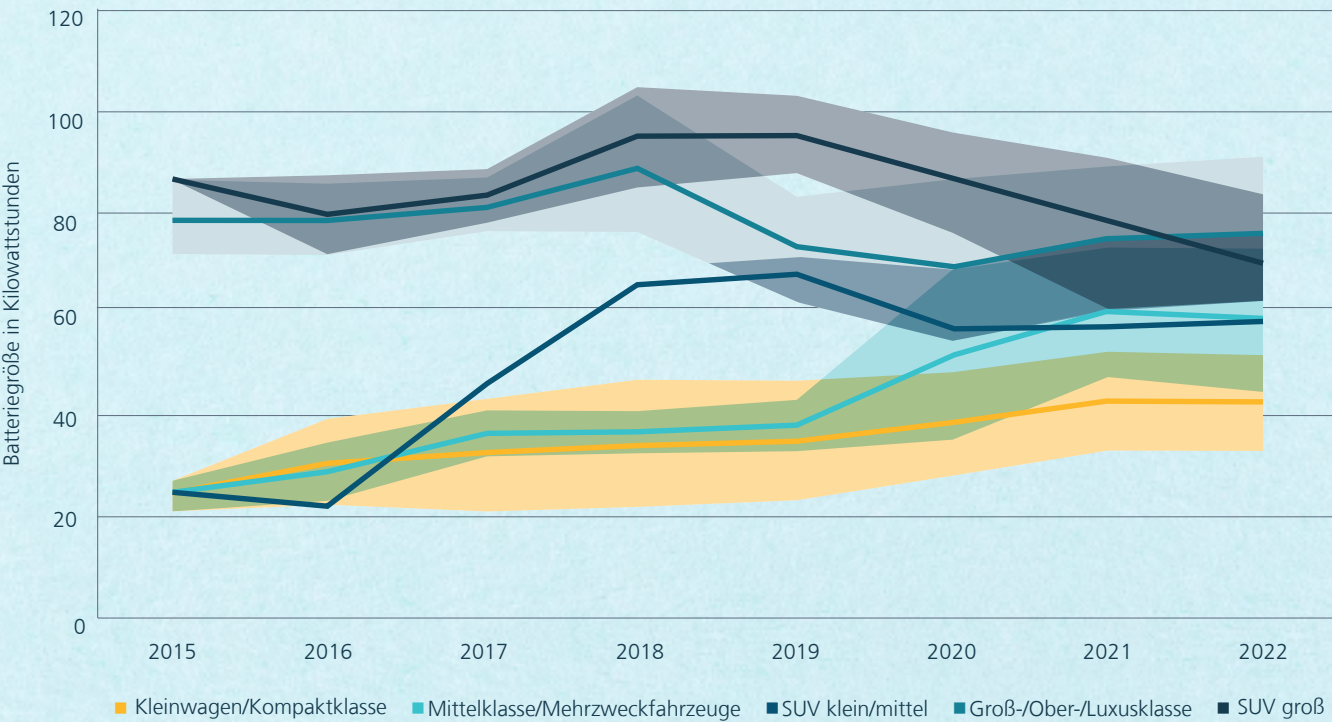


Abbildung 6 Segmentweise verkaufsgewichtete, durchschnittliche Batteriekapazität in Europa von 2015 bis 2022. Einfärbung zeigt Standardabweichung. Eigene Abbildung, basierend auf [44]

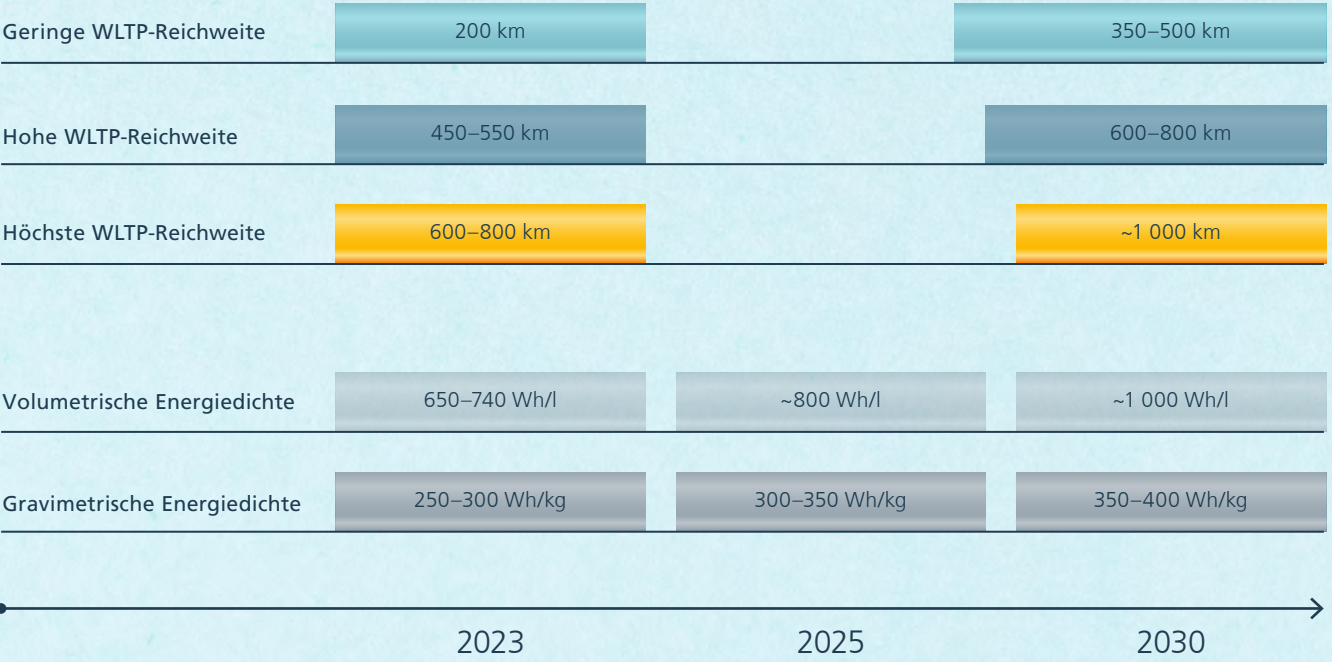


Abbildung 7 Roadmap zu aktuellen und künftigen Reichweiten von Elektrofahrzeugen sowie Entwicklung der Energiedichten von Lithium-Ionen Batterien [12], Anmerkung: WLTP steht für »Worldwide Harmonised Light-Duty Vehicles Test Procedure« und beschreibt ein Testverfahren, um den Verbrauch eines Fahrzeugs zu bestimmen.

2030er Jahre durch Ausschuss der Gigafactories und danach hauptsächlich durch Altbatterien aus gebrauchten Elektroautos bestimmt. Vorbehandlungsprozesse umfassen die Sammlung der Batterie, deren Entladung und die Demontage sowie erste Verarbeitungsschritte. Diese beinhalten entweder eine mechanische Verarbeitung (Zerkleinern und Schreddern), um sogenannte »Schwarzmasse« zu erzeugen, oder ein Hochtemperaturschmelzen, um Metalllegierungen ohne brennbare Elemente zu erzeugen. Diese beinhaltet die Kathoden- und Anodenaktivmaterialien, in denen die meisten wertvollen Metalle stecken. Für Schwarzmasse werden verschiedene Trennverfahren (basierend auf Größe, Dichte und Magnetismus) angewendet, um verschiedene Materialien zu extrahieren. Die Schwarzmasse wird anschließend mittels Hydrometallurgie oder einem polymetallurgischen Ansatz raffiniert, wodurch sich wertvolle Stoffe wie Kobalt, Nickel und Lithium zurückgewinnen lassen [45]. Neue Verfahren im Direkt-Recycling werden weiterhin erforscht, um Batteriekomponenten wiederzuverwenden oder zu regenerieren, ohne deren chemische Strukturen aufzubrechen. Auf Basis der Ankündigungen bis Mitte 2024 könnten die Recyclingkapazitäten für LIBs in Europa voraussichtlich bis 2026 auf 330 Kilotonnen pro Jahr ansteigen [78]. Stand Januar 2025 zeigt sich jedoch, dass sich Ankündigungen nicht in dem zuvor genannten Umfang umsetzen lassen beziehungsweise verschoben wurden. Nichtsdestotrotz stehen theoretisch ausreichend Produktionskapazitäten zum Recycling der zukünftig anfallenden Batterien sowie des Produktionsausschusses zur Verfügung. Bis zum Jahr 2035 könnten dabei 30 Prozent des Bedarfs an Lithium, Nickel und Kobalt für die Batteriezellenproduktion durch recycelte Materialien gedeckt werden. Die Rentabilität des Batterierecyclings hängt hauptsächlich von der chemischen Zusammensetzung der Batterie ab, die von den Preisen und der Verfügbarkeit von Primärmaterialien bestimmt wird, und es gibt große Unterschiede zwischen Batterien mit eher niedrigen Materialkosten, wie LFP und höherpreisigen mit NMC/NCA-Chemien [79, 80]. Darüber hinaus hängt die Rentabilität stark von den aktuellen Börsenpreisen für die Rohstoffe ab, die in den letzten Jahren stark schwankten. Der typische Restwert aktueller EV-Batterien am Ende ihrer Lebensdauer wird in der Regel auf 10–20 Prozent des ursprünglichen Preises beziffert und wird zukünftig insbesondere vom Materialwert abhängig sein [81].

Neben dem Recycling stellen aktuell vor allem Repair- und Refresh sowie Second-Use-Konzepte eine Option für noch verwendbare Batterien dar, um die Batterielebensdauer zu verlängern und so den ökologischen Fußabdruck zu verringern. Dies beinhaltet entweder die Aufbereitung und Wiederverwendung ganzer Module oder das Zerlegen der Module und die Herstellung neuer Batterien daraus. Stationäre Energiespeicher für Privathaushalte, Gewerbe- und Industrieunternehmen und den Energiesektor sind dabei die Hauptanwendungsfelder. Solche Anwendungsfälle existieren auch bereits, wie zum Beispiel zur lokalen Kombination mit Solar- oder PV, zur Primärregelleistung

zur Stabilisierung des Netzes [82], zur Notstromversorgung oder zum Einsatz von batteriegestützter EV-Ladeinfrastruktur zur Lastverschiebung und Reduzierung des Netzstrom-/Energiebedarfs [83]. Allerdings sind Second-Use-Konzepte immer noch eher die Ausnahme als die Regel.

In Bezug auf eine Reduktion der CO₂-Emissionen gehen Studien davon aus, dass sich durch die Kombination aus Zweitnutzung und Recycling der ökologische Fußabdruck von Batterien um 35–80 Prozent reduziert werden kann [84, 85].

11

Ist die Nutzung der Pkw-Batterie als mobiler Speicher sinnvoll?

Im Stromsystem werden durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien zunehmend Stromspeicher benötigt. E-Pkw lassen sich neben ihrer Funktion als Transportmittel auch als mobile Energiespeicher einsetzen, das heißt, sie werden nicht nur be- sondern auch entladen. Dieses sogenannte bidirektionale Laden bietet sich an, da Pkw im Schnitt circa 95 Prozent der Zeit stehen [67]. Die gespeicherte Energie kann in unterschiedlichen Anwendungsfällen eingesetzt werden, beispielsweise zur Versorgung elektrischer Geräte (vehicle-to-load, V2L), eines Hauses (vehicle-to-home, V2H), eines Gewerbegebäudes (vehicle-to-building, V2B) oder auch zur Bereitstellung von Energie für das Stromnetz (vehicle-to-grid, V2G).

Durch den Einsatz der Fahrzeugbatterien als mobile Speicher können sich für das gesamte Stromsystem verschiedene Vorteile ergeben. Beispielsweise können das Netz geschont und Netzausbau verzögert/vermieden werden, Backup-Kapazitäten aus anderen Kraftwerken eingespart und mehr Erneuerbare Energien integriert werden. Neben der Reduktion von Treibhausgas-Emissionen lassen sich so auch die Kosten des Systems reduzieren. Durch bidirektionales Laden könnten die Gesamtkosten des Stromsystems bereits in 2040 um bis zu circa 2,5–13 Prozent jährlich sinken [86, 87] abhängig von Faktoren wie beispielsweise der Verbreitung bidirektionaler Fahrzeuge und Infrastruktur.

Auch können die Pkw-Nutzenden durch den Einsatz des E-Pkws als mobiler Speicher wirtschaftlich profitieren. So lassen sich zum Beispiel Ladekosten minimieren und/oder zusätzlicher Ertrag erzielen. Einsparungen für Heimanwendungen der Fahrzeugbatterie liegen gemäß Studien in einem mittelgroßen Haushalt mit PV-Anlage bei circa 300–730 EUR pro Jahr (zum Beispiel [86, 87]) und sind sehr abhängig von Faktoren wie der Fahrzeugnutzung und den Ladeorten, der Größe der Fahrzeugbatterie und der PV-Anlage und der Möglichkeit von zusätzlichem preisoptimiertem Laden. Wird zusätzlich ins Stromnetz

zurück eingespeist und Preisdifferenzen am Großhandelsmarkt genutzt (Arbitrage), können Erträge von mehr als 1.000 EUR pro Jahr und Fahrzeug erwirtschaftet werden [87, 88]. Den Erträgen entgegen stehen die zusätzlichen Kosten für bidirektionale Heimpladesäulen, welche Experten langfristig auf maximal circa 100 EUR teurer als konventionelle Ladesäulen schätzen [86].

Die Befürchtung, dass eine Nutzung der Fahrzeugbatterie als mobiler Speicher aufgrund der negativen Auswirkungen auf die Lebensdauer nicht wirtschaftlich sei, ging in den letzten Jahren zurück. Batterien halten heute deutlich länger, in der Regel auch über typische Garantiezeiten und sogar das Pkw-Alter hinaus [89], und erste Pkw-Anbieter geben bereits längere Garantiezeiten auf die Batterie im Vergleich zu üblichen Garantiezeiten für Verbrennungsmotoren. Zudem kann sich eine intelligente Steuerung des Ladens in vielen Fällen sogar positiv auf die Batterielebensdauer auswirken [90, 86]. Allerdings müssen noch weitere Praxiserfahrungen gesammelt werden insbesondere auch bezüglich der Batterienutzung, wie zum Beispiel die Anzahl an Schnellladevorgängen oder die permanente Hoch- und Tiefbelastung.

Die Rahmenbedingungen für die Nutzung der Pkw-Batterien als mobile Speicher verbessern sich in Deutschland zunehmend. Derzeit ist die Verfügbarkeit bidirektional ladefähiger Fahrzeuge und Infrastruktur noch gering. Jedoch haben viele Automobil- und Ladestationshersteller Modelle für einzelne oder alle der genannten Anwendungsfälle angekündigt, allerdings teilweise mit Einschränkungen für den Einsatz als mobiler Speicher [91]. Wichtig ist für die Zukunft, dass die Industrie ihre technischen Ansätze vereinheitlicht, sodass unterschiedliche Fahrzeugtypen und Ladesäulen miteinander kompatibel sind. Zudem besteht ab 2025 die Pflicht zum Einbau von Smart Metern — ab einer gewissen Verbrauchsmenge an Strom, welche ein Haushalt mit einem E-Pkw normalerweise erreicht, oder ab einer gewissen Einspeisemenge an Strom, die heute mit neueren PV-Anlagen ebenfalls oft erreicht wird — circa 50 Prozent der E-Pkw-Nutzer:innen besitzen bereits eine eigene PV-Anlage [92, 93]. Auch sind größere Energieversorger in Deutschland ab 2025 verpflichtet, dynamische Tarife einzuführen, wodurch sich das Nutzen der Pkw-Batterien als mobile Speicher noch mehr lohnen kann. Einige Anbieter mit dynamischen Preisen sind bereits auf dem Markt. Regulatorisch gibt es für V2H und V2B kaum Hürden; für V2G gilt es noch regulatorische Hürden zu beseitigen. Beispielsweise sollten finanzielle Doppelbelastungen beim Be- und Entladen reduziert und die Umsetzung relevanter Standards vereinheitlicht werden, um die Kompatibilität unterschiedlicher Fahrzeuge mit unterschiedlichen Ladestationen zu ermöglichen. Wichtig ist für eine weitere Verbreitung zudem die Akzeptanz der Nutzenden. Auch müssen noch existierende Bedenken zum Beispiel bezüglich möglicher Reichweiteinschränkung oder der Bereitstellung von Daten ausgeräumt und attraktive Tarife angeboten werden.

12

Welche Maßnahmen können die sozialen und ökologischen Auswirkungen in der Wertschöpfungskette verbessern?

Im Folgenden werden Verbesserungsmaßnahmen für ökologische und soziale Auswirkungen entlang der Wertschöpfungskette der E-Pkw diskutiert. Zu diesem Zweck werden einzelne ökologische und soziale Auswirkungen benannt, die allerdings in dieser Form weder für einen Vergleich zu anderen Antriebstechnologien noch für eine Einschätzung zur Umweltbilanz insgesamt geeignet sind. Diese Punkte werden in Frage 03 behandelt. Nicht thematisiert werden in diesem Abschnitt die schädlichen ökologischen Auswirkungen bei herkömmlichen Pkw, zum Beispiel belastet die Erdölgewinnung, der Transport sowie die Unfälle mit Öl die Ökosysteme signifikant. Darüber hinaus finden auch die sozialen Auswirkungen durch Korruption oder die Zerstörung der Ernährungsgrundlage in den Abbaugebieten in diesem Abschnitt keine Berücksichtigung.

Bei den negativen ökologischen Auswirkungen der E-Pkw fallen Rohstoffgewinnung und Herstellung besonders ins Gewicht [94, 95]. Grund dafür sind einerseits hohe Rohstoffbedarfe und die aufwendige Herstellung. Andererseits erhöhen die vor Ort oft unzureichenden Umwelt-, Sozial- und Sicherheitsstandards beziehungsweise fehlende Kontroll- und Regulierungsmechanismen zur Durchsetzung der Standards die entsprechenden Auswirkungen.

Im Folgenden gehen wir auf aktuelle soziale und ökologische Auswirkungen in der Wertschöpfungskette der Batterien ein, welche sich zukünftig insbesondere durch einen Wechsel der Batterietechnologie ändern können. Für die NMC-Batterien relevante Rohstoffe sind Kobalt, Lithium, Nickel, Mangan und Graphit, während LFP-Batterien kein Kobalt (und stattdessen Eisen) enthalten. E-Pkw benötigen außerdem die Seltenen Erdelemente Neodym, Praseodym und Dysprosium für den Antriebsmotor sowie Kupfer.

Bei der Gewinnung von Lithium aus Salzseen in Chile, Argentinien und Bolivien stellt die Wasserverknappung bei schon bestehender Wasserknappheit die größte Sorge dar, wozu allerdings noch Forschungsbedarf besteht. Eng verknüpft mit dieser Frage sind Konflikte mit ortsansässigen indigenen Bevölkerungsgruppen [96, 97].

60 Prozent des weltweit abgebauten Kobalts stammen aus dem Kongo, davon wiederum 15 bis 20 Prozent aus dem Kleinbergbau [98], wobei der Anteil jährlich stark schwankt, da der Kleinbergbau insbesondere schnell auf Nachfrageimpulse reagieren kann [99]. Aus fehlenden Arbeitsschutzmaßnahmen im Kleinbergbau resultieren unter anderem der direkte Kontakt mit

Schwermetallen (insbesondere Uran) im Gestein sowie tödliche Unfälle. Kinder werden für leichte Zuarbeiten beim Verkauf, aber auch für schwerste und risikoreiche Arbeiten in Vollzeit eingesetzt. Darüber hinaus hat die Ausweitung großangelegter Kobaltabbauprojekte zur Zwangsumsiedlung ganzer Gemeinschaften geführt [100]. Diesen Missständen gegenüber steht die Tatsache, dass der Kleinbergbau den beteiligten Menschen eine existenzsichernde Erwerbstätigkeit ermöglichen kann [98].

Ein Boykott des kongolesischen Kleinbergbaus verbessert die Situation der beteiligten Menschen nicht. Vielmehr müssen die Bedingungen verbessert und der Kleinbergbau dafür angemessen unterstützt und kontrolliert werden. Dafür haben die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und das kongolesische Bergbauministerium in langjähriger Zusammenarbeit den Zertifizierungsstandard Certified Trading Chains (CTC) entwickelt. 2024 wurden erste Audits im Kobalt-Kleinbergbau durchgeführt [99, 101].

Starke staatliche Institutionen in den Bergbauländern sind der wichtigste Faktor für Verbesserungen der Umwelt- und Sozialstandards. Es gibt keine einfache Lösung für diese Probleme, sie sind oft mit Armut und der Lebensweise der Menschen verbunden [102]. Aus Perspektive der rohstoffverarbeitenden Länder und Unternehmen ist die Etablierung verpflichtender unternehmerischer Sorgfaltspflichten der vielversprechendste Ansatz zur Bekämpfung von Missständen. Diese Sorgfaltspflichten beinhalten, dass Unternehmen soziale und ökologische Risiken in ihren Wertschöpfungsketten kennen, offenlegen und durch Maßnahmen abmildern. Gesetzliche Vorgaben schaffen einheitliche Bedingungen für alle Unternehmen. In Deutschland gilt das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz sektorübergreifend für Unternehmen mit mehr als 1.000 Mitarbeitenden [103]. Auf EU-Ebene wurde die Europäische Lieferkettenrichtlinie beschlossen [104]. Diese rechtlichen Entwicklungen treffen jedoch auf starke Widerstände von Unternehmensverbänden, die in der aufwendigen Prüfung Nachteile gegenüber internationalen Wettbewerbern sehen. Nichtsdestotrotz sind unternehmerische Sorgfaltspflichten aus Sicht der Nachhaltigkeitsforschung ein entscheidender Hebel für Verbesserungen, da Konsument:innen die sehr komplexen Zuliefererketten nicht überblicken und mit Konsumententscheidungen nur sehr begrenzt beeinflussen können [105].

13

Ist die Brandgefahr von E-PKW hoch?

Vergleicht man die Häufigkeit von Bränden von Elektro-PKW mit den von konventionellen PKW ist nach heutigem Stand nicht von einer höheren Brandgefahr auszugehen [106, 107,

108]. Es gibt sogar eine Reihe an aktuellen Studien, die bei reinen Batteriefahrzeuge von einer deutlich geringeren Brandgefahr ausgehen [109, 108, 110]. Allerdings ist die Datenlage teilweise noch gering und es kann zu Verzerrungen kommen unter anderem aufgrund des unterschiedlichen Fahrzeugalters von E-Pkw gegenüber konventionellen Pkw [111].

Beim Brand von Lithium-Ionen-Batterien werden, ebenso wie bei anderen Bränden, Atemgifte, gesundheitsschädliche Verbrennungsprodukte und -rückstände in erheblichem Maße freigesetzt. Die Brände von LIB können unter anderem durch mechanische Beschädigung sowie interne und externe Ereignisse (zum Beispiel Beflammung oder Kurzschlüsse) ausgelöst werden. Während des Brandes einer LIB kann es zum sogenannten Thermal Runaway (thermisches Durchgehen) kommen, wenn eine Zelle nach der anderen durchbrennt.

Durch neue Batterietypen sinkt derzeit die Brandgefahr. So hat sich der Anteil von Lithium-Eisenphosphat-Akkus (LFP-Akkus) in den letzten Jahren erhöht (vergleiche Frage 04). Aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und der thermischen Stabilität ist die Brandgefahr deutlich niedriger gegenüber LIB [112]. Auch die derzeit aufkommenden Natrium-Ionen Batterien weisen eine geringere Brandgefahr auf. Diese Entwicklungen können die Akzeptanz von E-Pkw fördern.

Falls ein Elektro-Pkw brennt, kann man zwar die einzelne Zelle nicht direkt löschen, jedoch die Batterie mit Löschwasser insgesamt herunterkühlen, so dass ein Thermal Runaway vermieden wird. Ein größerer Brand kann mit herkömmlichen Löschfahrzeugen mit Wasser gelöscht werden oder alternativ kann man das Fahrzeug kontrolliert ausbrennen lassen. Eine elektrische Gefährdung der Einsatzkräfte durch die Hochvoltanlage von Hybrid- oder Elektrofahrzeugen ist konstruktionsbedingt unwahrscheinlich (unter anderem werden die Hochvoltspeicher bei einem Unfall vom Bordnetz getrennt).

Ein Nachteil ist, dass man deutlich mehr Löschwasser für das Löschen eines E-Pkw benötigt. Hier arbeitet man an Lösungen, das Löschwasser gezielt über Zugänge direkt in die Batterie zu leiten (sogenannte Löschlanzen). Das Einbringen des Fahrzeugs in einen wasserdichten Container ist ebenfalls möglich, ist in der Regel aber nicht notwendig und gilt als eher unpraktikabel. Es wird derzeit auch an der Entwicklung von extrem hitzebeständigen Löschdecken gearbeitet, um unter anderem das Ausbreiten des Feuers auf nebenstehende Fahrzeuge oder umliegende Objekte zu verhindern. Dies ist unter anderem in einer Tiefgarage von Bedeutung.

Eine Schwierigkeit beim Akkubrand in Elektroautos kann die zeitliche Distanz zum eigentlichen Unfall sein. Selbst wenn der erste Brand beispielsweise durch die Feuerwehr gelöscht wurde, geht von einem defekten Akku noch wesentlich länger eine Gefahr aus. Deshalb sollte nach dem Löschen der E-Pkw

überwacht werden, um ein Wiederaufleben des Feuers auszuschließen und gewisse Vorkehrungen beim Abtransport und der Lagerung des verunfallten Fahrzeuges sind einzuhalten. Dazu gibt es ein ausführliches Regelwerk [113].

Derzeit gibt es immer wieder Diskussionen beziehungsweise Einzelfälle, dass E-Pkw in Parkhäusern oder auf Fähren verboten werden. Bisherige Brandereignisse und Brandexperimente mit Elektrofahrzeugen in überbauten Infrastrukturen etwa Tunneln oder Garagen lassen nicht erkennen, dass sich das Risiko im Vergleich zu den ohnehin vorhandenen Gefahren erheblich erhöht [114]. Bei einer baurechtskonform errichteten Garage stehen das Abstellen sowie das Aufladen von Elektrofahrzeugen mit einer zertifizierten Ladeeinrichtung nicht im Widerspruch zum geltenden Bauordnungsrecht [114].

14

Wer möchte E-Autos und wie stabil ist das Interesse an der Elektromobilität?

Der rückläufige Anteil von Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen in 2024 steht in einem direkten zeitlichen Zusammenhang mit dem Wegfall der Kaufpreisförderung für diese Fahrzeuge (vergleiche Frage 01). Er wirft aber auch die Frage auf, ob das notwendige Grundinteresse an Elektroautos für einen erneuten Anstieg der Kaufzahlen in der deutschen Bevölkerung vorhanden ist und ob es unterschiedliche Erwartungen oder Unsicherheiten bei der Wahl des Fahrzeugantriebs gibt.

Befragungsdaten zeigen, dass ein großer Teil der Gesamtbevölkerung generell interessiert an Elektroautos ist. Zwischen 2020 und 2024 zeigen die Ergebnisse wiederholt eine durchschnittlich positive Einstellung zu Elektroautos [115, 92, 116]. Rund ein Drittel aller Befragten hatten über diesen Zeitraum außerdem ein generelles Interesse an der Technologie und waren offen für eine zukünftige Nutzung [117]. Außerdem gaben durchweg rund 10 Prozent der befragten Personen an, sich in den nächsten Jahren ein Elektroauto anschaffen zu wollen [115, 117]. Es gibt also ein gleichbleibendes, generelles Interesse an Elektroautos bei rund einem Drittel der deutschen Bevölkerung.

E-Autos werden inzwischen auch häufiger von Frauen gekauft und genutzt, sind aber noch nicht in allen Bildungs- und Einkommensgruppen angekommen. Während die sogenannten »Early Adopter« in frühen Studien noch überwiegend männlich waren (rund 90 Prozent in [93]), zeigt sich inzwischen ein gemischteres Bild (rund 62 Prozent in [92], rund 52 Prozent in [118]). Die Befragungsdaten zeigen jedoch auch, dass die meisten E-Auto-Nutzer:innen weiterhin höher gebildet und höher verdienend als die Durchschnittsbevölkerung sind. Die Gruppe

der Besitzer:innen von Elektroautos ähnelt also zunehmend der Gesamtbevölkerung, doch gering verdienende Personen greifen weiterhin häufiger zu Verbrennern.

Diese Ergebnisse zeigen, wie wichtig Rahmenbedingungen sind. Die Verkaufszahlen hängen direkt davon ab, ob die über 40 Prozent der Befragten, die Elektroautos in Zukunft kaufen und nutzen möchten oder daran interessiert sind, dies auch tun werden. Der wichtige Aspekt der Anschaffungskosten (vergleiche Frage 02) erklärt, warum bisher vor allem höher verdienende Personen ein E-Auto gekauft haben. Hierzu passend wird eine Kaufprämie für Elektroautos von den Befragten mehrheitlich positiv bewertet [117]. Eine weitere wichtige Rahmenbedingung ist, auch nach eigener Angabe der Befragten, die Ladeinfrastruktur. Allgemein zeigt sich in empirischen Studien, dass sich die Verfügbarkeit von öffentlicher und halböffentlicher Ladeinfrastruktur, wie zum Beispiel am eigenen Arbeitsplatz, positiv auf die gesellschaftliche Akzeptanz auswirkt (vergleiche Frage 09). Außerdem kann die Sichtbarkeit von Ladeinfrastruktur im Alltag zu einer Steigerung der Akzeptanz führen [116]. Ein solcher Aufbau von Ladeinfrastruktur wird mehrheitlich und kontinuierlich von der Bevölkerung unterstützt [117].

Auch Medien tragen dazu bei, wie sicher die Bevölkerung in ihren Entscheidungen zur Elektromobilität ist und wie eindeutig sie die Faktenlage und politische Richtungsweisung zu den erhältlichen Technologien wahrnimmt. Die häufige, überwiegend positive und einheitliche Berichterstattung zu E-Autos in deutschen Tageszeitungen hatte einen durchschnittlich positiven Effekt auf die Einstellungen der Leser:innen [115]. Der direkte Vergleich verschiedener alternativer Antriebstechnologien, wie Elektro- und Brennstoffzellenautos, kam in den Medien jedoch oft zu uneinheitlichen Ergebnissen [115]. Auch bei den Befragten zeigte sich 2020, dass nicht nur E-Autos durchschnittlich positiv bewertet wurden, sondern auch Brennstoffzellenfahrzeuge und E-Fuels (dies sind synthetische Kraftstoffe hergestellt auf der Basis von erneuerbarem Strom). Rund die Hälfte der Befragten erwartete außerdem, dass sich in Zukunft mehrere Alternativen durchsetzen würden, auch wenn Brennstoffzellenfahrzeuge und E-Fuels im Gegensatz zu E-Autos noch nicht breit am Markt verfügbar sind. Uneinheitliche Technologievergleiche in den Medien können diese Unsicherheiten verstärken. Eine effektivere Kommunikation, dass Industrie und Politik klar von einer überwiegend elektrischen Pkw-Flotte in der Zukunft ausgehen, kann diese Unsicherheiten reduzieren, die dem weiterhin vorhandenen Interesse der Bevölkerung an Elektromobilität gegebenenfalls im Weg stehen können.

Literatur

- 
- [1] **IPCC:** AR6 Synthesis Report Climate Change 2023, Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [2] **IEA:** Transport – Energy System – IEA, Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.iea.org/energy-system/transport>
- [3] **IEA:** Global EV Outlook 2024, Moving towards increased affordability. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
- [4] **T. Gnann, D. Speth, M. Krail und M. Wietschel:** Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3, 045-Szenarien, Modul Verkehr, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, 2024, doi: 10.24406/w34244.
- [5] **IEA:** World Energy Outlook 2024, Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/efba04ce-2472-4df1-9873-fb170c055259/WorldEnergyOutlook2024.pdf>
- [6] **Statistisches Bundesamt (Destatis):** Neuzulassungen: Anteil von Elektroautos bleibt gering. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Verkehr/E_PKW_Neuzulassungen.html
- [7] **ADAC:** Pkw-Neuzulassungen im Februar 2025: E-Autos deutlich erhöht. [Online] Verfügbar: <https://www.adac.de/news/neuzulassungen-kba/>
- [8] **P. Keller und T. Wicke:** Verkaufszahlen von Elektroautos: Vorübergehende Flaute oder anhaltende Trendumkehr? Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/elektroautos-verkaufszahlen-hybrid-flaute-deutschland-europa.html>
- [9] **Agora Verkehrswende und BCG:** 15 Millionen Elektrofahrzeuge bis 2030: Wege zum Ziel und die Rolle chinesischer Automobilhersteller, 2024 [Online] Verfügbar: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2024/15-Millionen-Ziel-China_mit-BCG/20240726_15M_Ziel_Wege_und_Rolle_China_Publikationsversion.pdf
- [10] **R. O. Harthan et al.:** Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). Umweltbundesamt, 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/475591>
- [11] **A. Burnham et al.:** Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains, United States, 2021, doi: 10.2172/1780970.
- [12] **T. Hettesheimer et al.:** Lithium-Ion Battery Roadmap – Industrialization Perspectives toward 2030, 2023, doi: 10.24406/publica-2153. [Online]. Verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2023/Fraunhofer-ISI_LIB-Roadmap-2023.pdf
- [13] **DEKRA:** Sind Elektrofahrzeuge teurer bei Reparaturen? Zugriff am: 28. November 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.dekra.de/de/sind-elektrofahrzeuge-teurer-bei-reparaturen/>
- [14] **M. Krail und P. Plötz:** Factsheet TCO – Ein Wirtschaftlichkeitsvergleich von Antriebsarten bei Pkw, 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2023/03/NOW_Factsheet_Vergleich-Antriebsarten-Pkw.pdf
- [15] **M. Wietschel, C. Moll, S. Oberle, B. Lux, S. Timmerberg und N. Ashley-Belbin:** Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw: Endbericht, 2019. Gefördert vom Biogasrat+ e.V.
- [16] **Agora Verkehrswende:** Ein Kostenvergleich zwischen batterieelektrischen und verbrennungsmotorischen Pkw als Klimaschutzoption für das Jahr 2030. Zugriff am: 16. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Die_Kosten_synthetischer_Brenn-_und_Kraftstoffe_bis_2050/Agora_Verkehrswende_Kostenvergleich_WEB.pdf
- [17] **T. Gnann:** Market diffusion of plug-in electric vehicles and their charging infrastructure, 2015. Verfügbar: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/dc0394d7-75f9-48ea-9e04-dcbee64a1d72>

[18] **Global X:** What's Driving the Electric Vehicle, Lithium, and Battery Markets in 2019?, Zugriff am: 16. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.globalxetfs.com/whats-driving-the-electric-vehicle-lithium-and-battery-markets-in-2019/>

[19] **BCG:** The Future of Battery Production for Electric Vehicles. Zugriff am: 16. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.bcg.com/publications/2018/future-battery-production-electric-vehicles>

[20] **E. D. Özdemir:** The future role of alternative powertrains and fuels in the German transport sector : a model based scenario analysis with respect to technical, economic and environmental aspects with a focus on road transport, Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung 108, 2012, doi: 10.18419/opus-1976.

[21] **ICCT:** Power play: How governments are spurring the electric vehicle industry: White Paper, 2018. Verfügbar: <https://theicct.org/publication/power-play-how-governments-are-spurring-the-electric-vehicle-industry/>

[22] **ADAC:** Kommentar, <https://assets.adac.de/Autodatenbank/Autokosten/E-AutosVergleich.pdf>. eFahrer: <https://efahrer.chip.de/kostenrechner>, eStations: <https://www.e-stations.de/elektroautos/kostenrechner> oder Websites der Verkaufsportale: <https://guide.autoscout24.ch/de/elektromobilitaet/kostenrechner-elektroauto/>, <https://www.evium.de/compare-calculator/compare-calculator>.

[23] **Joanneum Research:** Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen, 2019. [Online] Verfügbar: <https://www.oeamtc.at/thema/auto-kauf/experten-tool-zeigt-erstmal-gesamtumweltbilanz-aller-pkw-antriebsarten-32522717>

[24] **European Commission:** Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA, 2020. [Online] Verfügbar: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1f494180-bc0e-11ea-811c-01aa75ed71a1>

[25] **M. Wietschel, K. Biemann, S. Link und H. Helms:** Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien: Los 2 der Schwerpunktstudie Nachhaltige Mobilität für die Expertenkommission Forschung und Innovation. Studie unter Beteiligung des Ifeu-Instituts für Energie- und Umwelttechnik Heidelberg gGmbH, 2022.

[26] **VDI:** VDI-Analyse der CO₂-Emissionen von Pkw mit verschiedenen Antriebssystemen. Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2023.

[27] **K. Biemann et al.:** Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/13_2024_texte_analyse_der_umweltbilanz_von_kraftfahrzeugen_0.pdf

[28] **M. Wietschel, S. Link, K. Biemann und H. Helms:** Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien: Studie zum deutschen Innovationssystem, 9-2022, 2022.

[29] **Agora Verkehrswende:** Batteriestandort auf Klimakurs: Perspektiven einer klimaneutralen Batterieproduktion für Elektromobilität in Deutschland. Studie. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/Klimaneutrale-Batterieproduktion/59_klimaneutrale_Batterieproduktion.pdf

[30] **M. Groneweg und L. Weis:** Weniger Autos, mehr globale Gerechtigkeit – Diesel, Benzin, Elektro: Die Antriebstechnik allein macht noch keine Verkehrswende. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://power-shift.de/wp-content/uploads/2019/06/Studie-Weniger-Autos-mehr-globale-Gerechtigkeit.pdf>

[31] **T. Schmaltz, T. Wicke, L. Weymann, P. Voß, C. Neef und A. Thielmann:** Solid-State Battery Roadmap 2035+, Fraunhofer ISI, 2021, doi: 10.24406/publica-68.

[32] **X.-G. Yang, T. Liu und C.-Y. Wang:** Thermally modulated lithium iron phosphate batteries for mass-market electric vehicles, Nat Energy, Jg. 6, Nr. 2, S. 176–185, 2021, doi: 10.1038/s41560-020-00757-7.

[33] **CATL:** CATL Launches Superfast Charging Battery Shenhong, Opens Up Era of EV Superfast Charging. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.catl.com/en/news/6091.html>

[34] **Gotion:** Gotion High-tech Unveiled New Products and New Technology_News_News_Gotion. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://en.gotion.com.cn/news/company-news-282.html>

[35] **Bloomberg:** China's Batteries Are Now Cheap Enough to Power Huge Shifts, Bloomberg, 09. Juli 2024. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.bloomberg.com/news/newsletters/2024-07-09/china-s-batteries-are-now-cheap-enough-to-power-huge-shifts>

[36] **A. Stephan et al.:** Alternative Battery Technologies Roadmap 2030+, 2023, doi: 10.24406/publica-1342.

[37] **F. Maisel, C. Neef, F. Marscheider-Weidemann und N. F. Nissen:** A forecast on future raw material demand and recycling potential of lithium-ion batteries in electric vehicles, Resources, Conservation and Recycling, Jg. 192, S. 106920, 2023, doi: 10.1016/j.resconrec.2023.106920.

[38] **G. Angerer et al.:** Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, 2009. doi: 10.24406/publica-fhg-294279. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/682cdacd-57af-4d4c-bb78-8abb2f701cc3>

[39] **G. Angerer, F. Marscheider-Weidemann, M. Wendl und M. Wietschel:** Lithium für Zukunftstechnologien. Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/n/de/publikationen/Lithium_fuer_Zukunftstechnologien.pdf

[40] **M. Buchert, S. Degreif und P. Dolega:** Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität: Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen: Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende, 2017.

[41] **Öko-Institut e.V.:** Elektromobilität – Faktencheck. Zugriff am: 21. November 2019. [Online] Verfügbar: <https://www.oeko.de/publikationen/p-details/elektromobilitaetfaktencheck/>

[42] **BGR:** DERA Rohstoffinformationen 50 (2021), 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50-en.pdf

[43] **European Commission:** Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023. Final Report. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/study-critical-raw-materials-eu-2023-final-report_en

[44] **S. Link, L. Schneider, A. Stephan, L. Weymann und P. Plötz:** Feasibility of meeting future battery demand via domestic production in Europe. Nature Energy – accepted for publication, 2024.

[45] **G. Harper et al.:** Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles, Nature, Early Access, 2019. doi: 10.1038/s41586-019-1682-5.

[46] **J. Baars, T. Domenech, R. Bleischwitz, H. E. Melin und O. Heidrich:** Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials, Nat Sustain, Jg. 4, Nr. 1, S. 71–79, 2021. doi: 10.1038/s41893-020-00607-0. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nature.com/articles/s41893-020-00607-0>

[47] **N. Sharmili, R. Nagi und P. Wang:** A review of research in the Li-ion battery production and reverse supply chains, Journal of Energy Storage, Jg. 68, S. 107622, 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107622.

[48] **T. Schmaltz:** Recycling von Lithium-Ionen-Batterien wird in Europa stark zunehmen: Mengenszenarien von Lithium-Ionen-Batterien für das Recycling und deren Herkunft. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/recycling-lithium-ionen-batterien-europa-starke-zunahme-2030-2040.html>

[49] **European Commission:** RMIS – Lithium-based batteries supply chain challenges. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/analysis-of-supply-chain-challenges-49b749>

[50] **carwow:** Aktuelle Lieferzeiten für Elektroautos. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.carwow.de/ratgeber/elektroauto/lieferzeiten-elektroautos#gref>

[51] **Fraunhofer ISI:** Zellproduktion. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://metamarketmonitoring.de/de/zellproduktion/>

[52] **T. Wicke:** Ausgangsmaterialien von Batterien – die asiatische Dominanz bei Batteriekomponenten. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/batterien-ausgangs-materialien-asiatische-dominanz-bei-batterie-komponenten.html>

[53] **VDI/VDE-IT:** Resilient Supply Chains in the Battery Industry, 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ipcei-batteries.eu/fileadmin/Images/accompanying-research/publications/2023-03-BZF_Studie_Lieferketten-ENG.pdf

[54] **C. Neef und A. Balakrishnan:** Preisschwankungen bei Batterie-Rohstoffen: Wie die Automobilindustrie reagiert und welche Auswirkungen sie auf die Zellkosten haben. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/batterie-rohstoffe-preis-schwankungen-wie-reagiert-automobil-industrie-auswirkungen-zellkosten.html>

[55] **European Climate Foundation:** Low-carbon cars in Europe: A socio-economic assessment, Cambridge Econometrics, 2018.

[56] **M. Wietschel et al.:** Perspektiven des Wirtschaftsstandorts Deutschland in Zeiten zunehmender Elektromobilität, 2017.

[57] **L. Sievers, A. Grimm und C. Doll:** Transformation der Mobilität: Bestimmung der Beschäftigungseffekte in 2035 mit einem Input-Output-Modell: Arbeitspapier im Auftrag der Hans-Böckler-Stiftung, Karlsruhe, 2019.

[58] **IEA:** World Energy Employment 2024. Zugriff am: 20. Januar 2025. [Online] Verfügbar: <https://www.iea.org/reports/world-energy-employment-2024>

[59] **T. Hettesheimer, A. Thielmann und C. Neef:** VDMA Kurzgutachten: Beschäftigungsauswirkung einer Batteriezellproduktion in Europa (VDMA), 2018

[60] **Bdew:** Zweite BDEW Umfrage: Elektromobilität und Laden aus Nutzersicht. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.bdew.de/service/publikationen/zweite-bdew-umfrage/>

[61] **EV Database:** EV Database. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: https://ev-database.org/de/#group=vehicle-group&rs-pr=10000_100000&rs-er=0_1000&rs-fc=0_1500&rs-ac=2_23&rs-ts=100_350&rs-ub=10_200&rs-tw=0_2500&rs-ef=100_350&rs-sa=-1_5&s=1&p=0-10

[62] **S. Link, L. Schneider, A. Stephan, L. Weymann und P. Plötz:** Probabilistic feasibility of meeting future battery demand via domestic production in Europe., Nature Energy, 2025.

[63] **S. Link, M. Stephan, L. Weymann und T. Hettesheimer:** Techno-Economic Suitability of Batteries for Different Mobile Applications – A Cell Selection Methodology Based on Cost Parity Pricing, WEVJ, Jg. 15, Nr. 9, S. 401, 2024, doi: 10.3390/wevj15090401.

[64] **European Commission:** Consumer Monitor 2023 EAFO: European aggregated report. Luxembourg: Publications Office, 2024. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/system/files/documents/2024-06/EU%20Aggregated%20Report%202023_0.pdf

[65] **NMP AG 1:** Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor: Zwischenbericht 03/2019. Zugriff am: 12. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/03/NPM-AG-1-Wege-zur-Erreichung-der-Klimaziele-2030-im-Verkehrssektor.pdf>

[66] **NPE:** Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland: Statusbericht und Handlungsempfehlungen, 2015.

[67] **T. Gnann, A.-L. Klingler und M. Kühnbach:** The load shift potential of plug-in electric vehicles with different amounts of charging infrastructure, Journal of Power Sources, Jg. 390, S. 20–29, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.04.029.

[68] **Bdew:** BDEW-Strompreisanalyse Dezember 2024: Haushalte und Industrie. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>

[69] **M. Kühnbach et al.:** Potenziale von Stellplätzen an Wohn- und Nichtwohngebäuden zur Bereitstellung privater Ladeinfrastruktur, Fraunhofer ISI und Fraunhofer ISE, Freiburg, Karlsruhe, 2024, doi: 10.24406/publica-2743.

[70] **T. Gnann, S. Á. Funke, N. Jakobsson, P. Plötz, F. Sprei und A. Bennehag:** Fast charging infrastructure for electric vehicles: Today's situation and future needs, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Jg. 62, S. 314–329, 2018, doi: 10.1016/j.trd.2018.03.004.

[71] **P. Jochem, T. Gnann, J. E. Anderson, M. Bergfeld und P. Plötz:** Where should electric vehicle users without home charging charge their vehicle?, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Jg. 113, S. 103526, 2022, doi: 10.1016/j.trd.2022.103526.

[72] **NOW GmbH:** Verstehen | Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://nationale-leitstelle.de/verstehen/>

[73] **M. Robinus et al.:** Comparative analysis of infrastructures: Hydrogen fueling and electric charging of vehicles. Energie & Umwelt /Energy & Environment. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://juser.fz-juelich.de/record/842477/files/Energie_Umwelt_408_NEU.pdf

[74] **NPE:** Fortschrittsbericht 2018 – Markthochlaufphase. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/12/2018_Fortschrittsbericht_2018_Markthochlaufphase.pdf

[75] **S. Á. Funke, P. Plötz und M. Wietschel:** Invest in fast-charging infrastructure or in longer battery ranges? A cost-efficiency comparison for Germany, Applied Energy, Jg. 235, S. 888–899, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.134.

[76] **Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union:** Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG, 2023. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>

[77] **Kommentar:** Design, Produktion und Abfallmanagement von automobilen Lithium-Ionen Batterien in Europa werden durch die Richtlinie 2000/53/EG (»Altfahrzeug-Richtlinie«) und die Verordnung (EU) 2023/1542 (»Batterie-Verordnung«) beeinflusst. Diese Verordnung hat zum Ziel, verbesserte Nachhaltigkeits-, Recycling- und Sicherheitsanforderungen einzuführen und die Verfügbarkeit von Rohstoffen in Europa zu verbessern. Sie gilt für alle Hersteller, Produzenten, Importeure und Vertriebspartner von Batterien und erstreckt sich auf alle Batterien (unabhängig von ihrer Herkunft), die in der EU verkauft werden und betrifft ebenfalls Batterien für tragbare Geräte und leichte Verkehrsmittel (LMT). Um die genannten Ziele zu erreichen, wird die Verwendung bestimmter für den

Menschen oder die Umwelt schädlicher Stoffe eingeschränkt. Zudem wird die Deklaration des Kohlenstoff-Fußabdrucks und weitere Informationen gefordert, die unter anderem die Gehalte an recyceltem Kobalt, Blei, Lithium und Nickel in der Batterie angeben. Außerdem werden Mindestgehalte an recycelten spezifischen Materialien festgelegt: 16 Prozent für Kobalt (26 Prozent), 85 Prozent für Blei (85 Prozent), 6 Prozent für Lithium (12 Prozent) und 6 Prozent für Nickel (15 Prozent) bis 2031 (bis 2036). Große Marktteilnehmer, die Batterien auf dem EU-Markt platzieren, sind verpflichtet, eine Sorgfaltspflicht zu etablieren und umzusetzen, die die sozialen und ökologischen Auswirkungen entlang der Lieferkette berücksichtigt. Um Auskunft über die Beschaffenheit der Batterie zu erhalten und die Einhaltung der Anforderungen zu gewährleisten wird ein digitaler Batteriepass bis 2027 entwickelt, der Informationen über die Batteriekapazität, Leistung, Haltbarkeit und chemische Zusammensetzung über beispielsweise einen QR-Codes bereitstellt. In Bezug auf das Recycling und End-of-Life-Konzepte werden Mindestsammelquoten für tragbare und LMT-Batterien festgelegt, die auf 73 Prozent für tragbare und 61 Prozent für LMT-Batterien ansteigen. Die Sammlung der Altbatterien aus Fahrzeugen obliegt den Herstellern und deren unsachgemäße Entsorgung ist verboten. Gesammelte Batterien werden dem Recycling zugeführt. Die Recyclingeffizienz für komplette LI-basierte Batterien soll im Jahr 2026 bei 65 Prozent liegen und auf 70 Prozent bis Ende 2030 ansteigen. Es sind auch materialspezifische Recyclingziele vorgesehen: Der Anteil an zurückgewonnenem Lithium aus einer Batterie soll bis 2031 auf 80 Prozent steigen und für Kobalt, Kupfer, Nickel und Blei ist sogar eine Rückgewinnungsrate von 90 Prozent bis 2027 geplant. Um die Nutzung von Second-Use-Konzepten zu erleichtern, führt die Batterieverordnung auch Anforderungen an die Entfernbarkeit und die Möglichkeit zum Austausch von Batterien ein. Alle Batteriemangement-Systeme (BMS) müssen eine Software-Reset-Funktion haben, um die Batterie für den Einsatz in ihrem zweiten Leben oder End-of-Life nutzen zu können. Solche Konzepte und Designstrategien sollen dazu beitragen die Lebensdauer von Batterien zu verlängern und die Wiederverwendung von EV-Batterien fördern.

[78] **M. Stephan:** Batterierecycling in Europa nimmt weiter Fahrt auf: Recycling-Kapazitäten von Lithium-Ionen-Batterien in Europa. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/lithium-ionen-batterie-recycling-europa-kapazitaeten-update-2024.html>

[79] **R. Ma et al.:** Pathway decisions for reuse and recycling of retired lithium-ion batteries considering economic and environmental functions, *Nature communications*, Early Access, 2024, doi: 10.1038/s41467-024-52030-0.

[80] **J. Neumann et al.:** Recycling of Lithium-ion Batteries – Current State of the Art, *Circular Economy*, and Next Generation Recycling, *Advanced Energy Materials*, Jg. 12, Nr. 17, 2022, Art. Nr. 2102917, doi: 10.1002/aenm.202102917.

[81] **A. Burke und L. Fulton:** Analysis of advanced battery-electric long haul trucks: batteries, performance, and economics: Working Paper. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://ucdavis.app.box.com/s/cfpoywahc2so21hogykiga6h8r9ppxe>

[82] **BMW Group, Vattenfall und Bosch:** Ein zweites Leben für Elektroauto-Batterien: Vattenfall, BMW und Bosch testen Stromspeicher in Hamburg. Hamburg, München, Stuttgart, 2016. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0263968DE/ein-zweites-leben-fuer-elektroauto-batterien?language=de>

[83] **H. H. Heimes et al.:** Potenziale von Second-Use-Anwendungen für Lithium-Ionen-Batterien, in *Elektromobilität*, A. Kampker und H. H. Heimes, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024, S. 655–668.

[84] **P. Li, X. Xia und J. Guo:** A review of the life cycle carbon footprint of electric vehicle batteries, *Separation and Purification Technology*, Jg. 296, S. 121389, 2022, doi: 10.1016/j.seppur.2022.121389.

[85] **M. Gutsch und J. Leker:** Costs, carbon footprint, and environmental impacts of lithium-ion batteries – From cathode active material synthesis to cell manufacturing and recycling, *Applied Energy*, Jg. 353, S. 122132, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122132.

[86] **M. Kühnbach et al.:** Potential of a full EV-power-system-integration in Europe and how to realise it. Studie im Auftrag von Transport & Environment (T&E) Europe. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, 2024. Verfügbar unter: https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2024_10_Study_V2G_EU-Potential_Final.pdf

[87] **Ffe:** Bidirektionales Lademanagement – Abschlussbericht der FfE, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2023/03/BDL-Abschlussbericht.pdf>

[88] **L. Schmidt, N. Waxmann, D. Reichert und K. V. Boesche:** Bidirektionales Laden in Deutschland – Marktentwicklung und Potenziale. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Potenzialanalyse_bidirektionales_Laden.pdf

[89] **M. Hackmann, H. Knörzer und J. Pfeuffer:** Batteriealterung in der Praxis: Analyse von über 7.000 Fahrzeugen gibt tiefe Einblicke in Batterielebensdauer und Fahrzeug-Restwert. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.p3-group.com/p3-updates/batteriealterung-in-der-praxis/>

[90] **J. Gong et al.:** Quantifying the impact of V2X operation on electric vehicle battery degradation: An experimental evaluation, *eTransportation*, Jg. 20, S. 100316, 2024, doi: 10.1016/j.etrans.2024.100316.

[91] **Volkswagen:** Bidirektionales Laden | Laden und Reichweite | Volkswagen Deutschland. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.volkswagen.de/de/elektrofahrzeuge/laden-und-reichweite/smarter-laden.html>

[92] **M. Helferich et al.:** Tariff option preferences for smart and bidirectional charging: Evidence from battery electric vehicle users in Germany, *Energy Policy*, Jg. 192, S. 114240, 2024, doi: 10.1016/j.enpol.2024.114240.

[93] **A. Scherrer, U. Burghard, M. Wietschel und E. Dütschke:** Early Adopter von E-Fahrzeugen: Ladeleistungen, Eigenerzeugung und Einstellungen zum Lademanagement, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, Nr. 11, S. 23–26, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/259960>

[94] **C. Bauer, J. Hofer, H.-J. Althaus, A. Del Duce und A. Simons:** The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework, *Applied Energy*, Jg. 157, S. 871–883, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.019.

[95] **H. Helms, J. Jöhrens, C. Kämper, J. Giegrich und A. Lieblich:** Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen: (Texte 27/2016). Zugriff am: 16. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_2016_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf

[96] **S. Boddenberg:** Lithiumabbau in Chile – Fluch oder Segen?, *Deutsche Welle*, 27. April 2018. Zugriff am: 16. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.dw.com/de/lithiumabbau-in-chile-fluch-oder-segen/a-43401781>

[97] **T. C. Frankel und P. Whoriskey:** Tossed aside in the »white gold« rush. Indigenous people are left poor as tech world takes lithium from under their feet, *The Washington Post*, 2016.

[98] **BGR:** Die BGR – Commodity TopNews 53. Kobalt aus der DR Kongo – Potenziale, Risiken und Bedeutung für den Kobaltmarkt. Zugriff am: 16. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/53_kobalt-aus-der-dr-kongo.html

[99] **BGR:** Lieferketten und Abbaubedingungen im artisanalen Kupfer-Kobalt-Sektor der Demokratischen Republik Kongo, 2021.

[100] **Democratic Republic of the Congo:** Industrial mining of cobalt and copper for rechargeable batteries is leading to grievous human rights abuses, *Amnesty International*, 12. September 2023. Zugriff am: 16. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.amnesty.org/en/latest/news/2023/09/drc-cobalt-and-copper-mining-for-batteries-leading-to-human-rights-abuses/>

[101] **BGR:** DR Kongo: BGR unterstützt Akkreditierung von nationalen Auditoren. Zugriff am: 16. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Nachrichten/Aktuelles/2024/2024-03-15_dr-kongo-bgr-unterstuetzt-akkreditierung-von-nationalen-auditoren.html

[102] **DRC:** Why it's hard to make cobalt mining more transparent, *Deutsche Welle*, 19. März 2024. Zugriff am: 16. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.dw.com/en/drc-struggles-to-make-cobalt-mining-more-transparent/a-68610784>

[103] **BMJ:** Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten zur Vermeidung von Menschenrechtsverletzungen in Lieferketten. Zugriff am: 16. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/lksg/index.html>

[104] **European Union:** Richtlinie (EU) 2024/1760 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 über die Sorgfaltspflichten von Unternehmen im Hinblick auf Nachhaltigkeit und zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und der Verordnung (EU)2023/2859 (Text von Bedeutung für den EWR), 2024. Zugriff am: 16. Dezember 2024. [Online] Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32024L1760>

[105] **M. Bodenheimer:** Behavioral transitions to social sustainability in global production networks, Dissertation, Fraunhofer IRB-Verlag und Fraunhofer ISI, 2019 [Online]. Verfügbar unter: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/cbe179e7-3571-4ad0-a4df-dfb60d8f336d/content>

[106] **ADAC:** E-Auto brennt: So löscht die Feuerwehr. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/elektroauto/e-auto-loeschen/>

[107] **GDV:** Brennen E-Autos wirklich öfter? Zahlen und Fakten. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.gdv.de/gdv/themen/mobilitaet/dossier-elektromobilitaet/e-autos-elektroauto-braende-statistik-182792>

[108] **Wissenschaftliche Dienst:** Verhalten von Elektroautos im Brandfall. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.bundestag.de/resource/blob/891136/55c913be8b0207bcd76e911a66287f00/WD-8-002-22-pdf-data.pdf>

[109] **AutoinsuranceEZ:** Gas vs. Electric Car Fires in 2024 (Shocking Stats). Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.autoinsuranceez.com/gas-vs-electric-car-fires/>

[110] **Department of Energy and Climate:** Electric vehicles fact check. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.energyandclimate.qld.gov.au/energy/vehicles-and-energy/electric-vehicles/fact-check>

[111] **NOW GmbH**: Neue Broschüre zu Brandsicherheit von E-Pkw: Aktuelle Forschung und Wissen für den Alltag. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/neue-broschuere-zu-brandsicherheit-von-e-pkw-aktuelle-forschung-und-wissen-fuer-den-alltag/>

[112] **LionCare GmbH**: Brände bei Elektroautos löschen. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.lion-care.com/braende-bei-elektroautos-loeschen>

[113] **VDIK**: Unfallhilfe & Bergen bei Fahrzeugen mit Hochvolt- und 48V-Systemen: Antworten auf häufig gestellte Fragen. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: https://www.vdik.de/wp-content/uploads/2020/07/Unfallhilfe_Bergen_FAQ_dt_072020_VDIK-1.pdf

[114] **AGBF – Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren und des Deutschen Feuerwehrverbandes**: Keine erhöhte Brandgefahr durch in Tiefgaragen abgestellte Elektrofahrzeuge. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.feuerwehrverband.de/keine-erhoehte-brandgefahr-durch-in-tiefgaragen-abgestellte-elektrofahrzeuge/>

[115] **A. Scherrer**: How media coverage of technologies affects public opinion: Evidence from alternative fuel vehicles in Germany, *Environmental Innovation and Social Transitions*, Jg. 47, S. 100727, 2023, doi: 10.1016/j.eist.2023.100727.

[116] **J. Tröger und S. Preuß**: Charging at the workplace: boosting acceptance for electric mobility on the go? Empirical evidence from a pre-post-design study in Germany, 2024, doi: 10.24406/publica-3338.

[117] **J. Tröger, M. Helferich und E. Dütschke**: Ergebnisse des Projekts MobilKULT. Zugriff am: 13. Dezember 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/competence-center/energietechnologien-energiesysteme/projekte/mobilkult/ergebnisse.html>

[118] **R. Kunze, S. Preuß, J. Zwirnmann, P. Plötz und M. Wietschel**: Determining the share of renewable electricity in electric vehicle charging in Europe, *Energy Reports*, Jg. 12, S. 5834–5845, 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.11.044.

Impressum

**Fraunhofer-Institut
für System- und Innovationsforschung ISI**
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe

Kontakt
Martin Wietschel
Telefon +49 721 6809-254
martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

Axel Thielmann
Telefon +48 721 6809-299
axel.thielmann@isi.fraunhofer.de

Autor:innen
Martin Wietschel, Axel Thielmann, Till Gnann, Tim Hettesheimer, Sabine Langkau, Christoph Neef, Patrick Plötz, Luisa Sievers, Luis Tercero Espinoza, Jakob Edler, Michael Krail, Claus Doll, Steffen Link, Annegret Stephan, Aline Scherrer, Marian Klobasa, Daniel Speth, Tim Wicke, Michaela Schicho, Ann Wahu Kamamia, Antonia Loibl

Redaktion
Jacob Leidenberger

Grafische Gestaltung
Sabine Wurst

© Fraunhofer ISI
Karlsruhe 2025

Das Fraunhofer ISI

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI analysiert Entstehung und Auswirkungen von Innovationen. Wir erforschen die kurz- und langfristigen Entwicklungen von Innovationsprozessen und die gesellschaftlichen Auswirkungen neuer Technologien und Dienstleistungen. Auf dieser Grundlage stellen wir unseren Auftraggebern aus Wirtschaft, Politik und Wissenschaft Handlungsempfehlungen und Perspektiven für wichtige Entscheidungen zur Verfügung. Unsere Expertise liegt in der fundierten wissenschaftlichen Kompetenz sowie einem interdisziplinären und systemischen Forschungsansatz.