

Bedarf strategischer Rohstoffe für den Pkw- und Lkw-Sektor in Deutschland bis 2040

Bericht im Rahmen des Projekts "Analysen und Bewertungen der Klimaschutzwirkung von Instrumenten und Maßnahmen zur Treibhausgasminderung im Verkehr, Entwicklung von Gestaltungsoptionen" ELMO4010

Darmstadt, 30.11. 2023

Im Auftrag des
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

Autor*innen

Dr. Matthias Buchert,
Dr. Katharina Göckeler,
Cornelia Merz,
Dr. Nino Schön-Blume,
Inia Steinbach,
Wolf Görz,
Daniela Eckert,
Dr. Johannes Betz,
Öko-Institut e.V.

Wissenschaftlicher Review

Hinrich Helms
ifeu-Institut gGmbH

Kontakt

info@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Kontakt Reviewer

**ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung
Heidelberg gGmbH
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg
ifeu@ifeu.de**

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	8
1 Einführung	14
2 Methodisches Vorgehen	15
2.1 Definitionen der Szenarien	15
2.1.1 Definition Pkw-Szenarien	15
2.1.2 Definition Lkw-Szenarien	16
2.2 Definition der Systemgrenzen	16
2.3 Beschreibung der Schlüsselkomponenten der Fahrzeuge	17
2.3.1 Lithium-Ionen-Batterien	17
2.3.2 Elektromotoren	20
2.3.3 Brennstoffzellen	21
2.4 Beschreibung der Schlüsselkomponenten der Energieversorgungs- und Stromerzeugungsinfrastrukturen	22
2.4.1 Ladeinfrastruktur, Oberleitungssysteme und Wasserstoff-Tankstellen	22
2.4.2 Stromerzeugung auf Basis Erneuerbarer Energien	26
3 Die Hochlaufszzenarien 2030/2040	30
3.1 Markthochlauf für E-Pkw und E-Lkw	30
3.2 Rohstoffnachfrage für Antriebsbatterien	32
3.3 Rohstoffnachfrage für Elektromotoren	41
3.4 Platinbedarf für Brennstoffzellen	45
3.5 Rohstoffnachfrage für zugehörige Energie-Infrastrukturen	47
3.5.1 Endenergiebedarf der Elektrofahrzeuge	47
3.5.2 Rohstoffbedarf für den Zubau an Erneuerbaren Energien	48
3.5.3 Kupferbedarf für Fahrzeuge und Energie-Infrastrukturen	50
3.6 Gesamtbewertung Rohstoffnachfrage der Szenarien	52
4 Bewertung der Hochlaufszzenarien in Bezug auf die Wertschöpfungsketten	56
4.1 Wertschöpfungskette Lithium-Ionen-Batterien	56
4.2 Wertschöpfungskette Elektromotoren	62
4.3 Wertschöpfungskette Brennstoffzellen	64
4.4 Sonstige Wertschöpfungsketten	66
4.5 Fazit Bewertung der Wertschöpfungsketten	68

5	Empfehlungen aus den Ergebnissen der Studie	69
6	Referenzen	74
7	Anhänge	80
7.1	Materialzusammensetzung der EE-Anlagen	80

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Bedarfsabschätzung von Lade-Hubs an Autobahnen im Jahr 2035 auf Basis der lokalen Verkehrsstärke in 5 Größenkategorien („BEV“-Szenario)	24
Abbildung 2-2: Bedarfsabschätzung von Oberleitungssystemen an Autobahnen im Jahr 2035 auf Basis der lokalen Verkehrsstärke in 5 Größenkategorien („BEV + O-BEV“-Szenario)	24
Abbildung 3-1: Neuzulassungen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen (LNF) mit E-Antrieb	30
Abbildung 3-2: Neuzulassungen von solo Lkw (ohne Anhänger) und Last- und Sattelzügen (LSZ) mit E-Antrieb im Szenario „BEV“	31
Abbildung 3-3: Neuzulassungen von solo Lkw (ohne Anhänger) und Last- und Sattelzügen (LSZ) mit E-Antrieb in den Szenarien „BEV+FCEV“ und „BEV+O-BEV“	32
Abbildung 3-4: Bedarf an Batteriekapazität für E-Fahrzeuge	33
Abbildung 3-5: Gesamtgewicht des Bedarfs an Batterien für E-Fahrzeuge	34
Abbildung 3-6: Lithiumbedarf für Batterien E-Fahrzeuge	35
Abbildung 3-7: Kobaltbedarf für Batterien E-Fahrzeuge	36
Abbildung 3-8: Nickelbedarf für Batterien E-Fahrzeuge	37
Abbildung 3-9: Graphitbedarf für Batterien E-Fahrzeuge	38
Abbildung 3-10: Kupferbedarf für Batterien E-Fahrzeuge	39
Abbildung 3-11: Manganbedarf für Batterien E-Fahrzeuge	40
Abbildung 3-12: Gesamtgewicht und Lithiumbedarf für Batterien E-Lkw	41
Abbildung 3-13: Bedarf an E-Motorleistung für E-Fahrzeuge	42
Abbildung 3-14: Tonnagen der Permanentmagnete in Fahrzeug-Neuzulassungen und -Abmeldungen	43
Abbildung 3-15: Zusammensetzung Permanentmagnete in Elektromotoren in Gew%	44
Abbildung 3-16: Tonnagen Seltene Erden in Fahrzeug-Neuzulassungen und Fahrzeug-Abmeldungen	45
Abbildung 3-17: Platin in Neuzulassungen und Abmeldungen von Brennstoffzellen-Lkw und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (Pkw & Lkw) im Vergleich	46
Abbildung 3-18: Jährlicher Energiebedarf für E-Fahrzeuge im Vergleich der Szenarien	48
Abbildung 3-19: PV- und Wind-Zubau für E-Mobilität (Szenario „BEV“) und gesamtes Stromsystem	49

Abbildung 3-20: Zubau von EE-Anlagen in den unterschiedlichen Szenarien – Aufteilung in PV und Wind, kumuliert über 5-Jahres-Intervalle	49
Abbildung 3-21: Zubau von EE-Anlagen in den unterschiedlichen Szenarien – Aufteilung nach Fahrzeugtyp, kumuliert über 5-Jahres-Intervalle	50
Abbildung 3-22: Kupferbedarf für Energie-Infrastrukturen und Fahrzeuge – kumuliert (2021-2040)	51
Abbildung 3-23: Kupferbedarf für Ladeinfrastruktur, Oberleitungssysteme und zugehörige Umspannwerke in den kommenden Jahrzehnten	52
Abbildung 3-24: Direkte Treibhausgas-Emissionen von Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen im BEV-Szenario	55
Abbildung 4-1: Förderung von Lithium, Nickel, Kobalt, Graphit und Mangan in 2021	57
Abbildung 4-2: Wertschöpfungsstufen Lithium-Ionen-Batterien: Anteile VR China	58
Abbildung 4-3: Reserven von Lithium, Nickel, Kobalt, Graphit und Mangan in 2023	59
Abbildung 4-4: Bedarf an Lithium und Potenzial an Rezyklat aus dem Mobilitätssektor	61
Abbildung 4-5: Bedarf an Kobalt und Potenzial an Rezyklat aus dem Mobilitätssektor	61
Abbildung 4-6: Wertschöpfungsstufen Permanentmagnete: Anteil nach Ländern	62
Abbildung 4-7: Förderung und weltweite Reserven von Seltenen Erden 2021	63
Abbildung 4-8: Minenförderung Platin 2021	64
Abbildung 4-9: Reserven Platingruppenmetalle	65
Abbildung 4-10: Minenförderung Kupfer 2021	66
Abbildung 4-11: Kupferreserven 2021	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Annahmen zur Batteriekapazität je Fahrzeugklasse	18
Tabelle 2-2:	Annahmen zu Marktanteilen von Batterietypen für verschiedene Fahrzeugklassen in Prozent	19
Tabelle 2-3:	Annahmen zur Gesamtleistung der Antriebsmotoren je Fahrzeugklasse	21
Tabelle 2-4:	Bedarfsabschätzung von Energieversorgungsinfrastrukturen für E-Fahrzeuge	22
Tabelle 2-5:	Annahmen zur Abschätzung der Zubaubedarfe an Erneuerbaren Energien in Deutschland	27
Tabelle 2-6:	Anteile unterschiedlicher PV-Technologien	27
Tabelle 2-7:	Anteile unterschiedlicher Wind-onshore-Technologien	28
Tabelle 2-8:	Anteile unterschiedlicher Wind-offshore-Technologien	28
Tabelle 2-9:	Annahmen zur Abschätzung des Platin- und Iridiumbedarfs für Elektrolyseure	29
Tabelle 2-10:	Vollaststunden für Elektrolyseure sowie EE-Anlagen global günstiger Standorte und Transportverluste bei Wasserstoff-Import	29
Tabelle 7-1:	Ausgewählte Materialien in PV-Anlagen	80
Tabelle 7-2:	Ausgewählte Materialien in Windkraftanlagen (WKA)	81

Zusammenfassung

Der Hochlauf der Elektromobilität im Pkw-Bereich in Deutschland hat in den letzten Jahren deutlich an Dynamik gewonnen. Zusätzlich zeichnet sich, unterstützt durch regulatorische Rahmenbedingungen und technische Innovationen in der Batterie- und Antriebstechnik, auch für den Nutzfahrzeugbereich bis hin zu schweren Lastkraftwagen ein wachsender Marktanteil neuer Antriebssysteme in den nächsten Jahren ab. Der Verbrauch überwiegend fossiler Treibstoffe (Benzin- und Dieselkraftstoff) und die damit verbundenen enormen Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Straßenfahrzeuge werden entsprechend in den nächsten 10 bis 20 Jahren deutlich zurückgehen.

Im Zuge der Transformation der Antriebssysteme für Straßenfahrzeuge sind Diskussionen und Fragen zur Verfügbarkeit und verlässlichen Versorgung mit Schlüsselrohstoffen wie z. B. Lithium für die Antriebsbatterien zunehmend in den Fokus gerückt. Durch den Krieg Russlands gegen die Ukraine haben Untersuchungen zur Verlässlichkeit globaler Wertschöpfungsketten – ausgehend im ersten Schritt von der Gewinnung natürlicher Rohstoffe – zusätzliche Brisanz und Dringlichkeit erhalten.

Es werden dabei vor allem kurz- bis mittelfristig Risiken bei der Verfügbarkeit von Schlüsselmaterialien für die Elektromobilität gesehen. Während sich bei Pkw bereits eine Dominanz batterieelektrischer Antriebe abzeichnet, sind im Straßengüterverkehr die Technologiewahl bzw. deren Anteile im Markt (Batterie, Oberleitung, Brennstoffzelle) für die Erreichung der Klimaschutzziele noch nicht endgültig absehbar. Gleichwohl zeichnet sich auch hier mittlerweile klar ab, dass elektrische Antriebe eine zentrale Rolle einnehmen dürften. Versorgungsrisiken bei Schlüsselmaterialien werden in diesem Kontext bisher aber nicht tiefgehend diskutiert und es fehlt eine belastbare Grundlage mit Blick auf deren Relevanz im Verhältnis zur Elektrifizierung von E-Pkw.

Diese Studie möchte vor diesem Hintergrund für eine fundierte Debatte eine fachliche Grundlage bilden und sowohl den beschleunigten Markthochlauf der Elektromobilität im Pkw-Sektor (vgl. Koalitionsvertrag der Bundesregierung) als auch die verfügbaren Technologieoptionen im Lkw-Bereich aus einer Ressourcenperspektive betrachten. Andere Fahrzeuge mit alternativen Antrieben wie Busse, Pedelecs, Züge etc. werden im Rahmen dieser Studie nicht adressiert. Aus anderen Arbeiten ist bekannt, dass die Nachfrage nach Schlüsselkomponenten und Rohstoffen aus diesen Fahrzeugsegmenten gegenüber dem Pkw-Sektor und Lkw-Sektor als gering einzustufen sind [SKN 2023].

Um ein umfassendes Bild zu erhalten, wurden die absehbar mit der Transformation der Antriebe verbundenen Entwicklungen auf der Nachfrageseite intensiv untersucht und mit der Situation und möglichen Entwicklungen auf der Angebotsseite für die benötigten Rohstoffe, Komponenten und Technologien detailliert abgeglichen. Auf mögliche Schwachstellen bzw. Dysbalancen im dynamischen Spiel der Nachfrageseite mit der Angebotsseite wird explizit eingegangen. Die vorliegende Studie geht dabei davon aus, dass für das Ziel der Klimaneutralität eine Antriebswende im Pkw- und Lkw-Sektor ohne Alternative ist. Die Studie will vielmehr wichtige Handlungsbedarfe aufzeigen, um die Rohstoff- bzw. Komponentenversorgung für die Antriebswende robust und dauerhaft abzusichern.

Für den Pkw-Markt stellt die Markthochlauf-Modellierung ein Zielszenario dar, welches sich an zwei zentralen Zielgrößen orientiert: (1) Laut Koalitionsvertrag will die Bundesregierung bis zum Jahr 2030 rund 15 Millionen vollelektrische Pkw im Bestand erreichen [KoaV 2021] und (2) ab 2035 sollen nach Vorgabe der EU nur noch emissionsfreie Pkw und leichte Nutzfahrzeuge neu zugelassen werden [EU 2023].

Das verwendete Szenario stellt eine Aktualisierung aus der Studie *Klimaneutrales Deutschland 2045* dar unter Berücksichtigung der oben genannten Zielmarken [SKN 2023]. Als weitere Änderung wurden die zur Erreichung der Klimaschutzziele notwendigen Verlagerungen auf klimaschonende Transportmittel (ÖPNV, Schiene) in dieser Studie bewusst nicht berücksichtigt, um den Rohstoffbedarf für Elektrofahrzeuge im Falle eines vollständigen Antriebswechsels der Fahrzeugflotten in einem konservativen Ansatz auszuweisen. Die Neuzulassungen von Pkw bleiben daher in Summe ab dem Jahr 2035 konstant. Folglich sind Anstrengungen zur Verringerung des motorisierten Individualverkehrs ein direkter Hebel, die in dieser Studie ausgewiesenen Rohstoffbedarfe zu reduzieren.

Die Lkw-Szenarien basieren auf den im Forschungsprojekt *StratES: Strategie zur Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs* entwickelten Markthochlauf-Modellierungen [Göckeler et al. 2023]. Darin werden verbleibende Unsicherheiten bezüglich eines möglichen Antriebsmixes im Schwerlastverkehr anhand von drei Technologiepfaden berücksichtigt: (1) „BEV“: ein reiner Hochlauf von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen, (2) „BEV+FCEV“: eine Kombination aus batterieelektrischen Nutzfahrzeugen und Brennstoffzellenantrieben und (3) „BEV+O-BEV“: ein Mix aus batterieelektrischen Nutzfahrzeugen und vollelektrischen Oberleitungs-Lkw, welche dynamisch während der Fahrt über Oberleitungssysteme mit Strom versorgt werden können.

Die Systemgrenzen für die Szenarien, die in dieser Studie aufgestellt und ausgewertet werden, können wie folgt konkretisiert werden:

- Zeitrahmen 2020 bis 2040, Ergebnisdarstellung in Fünfjahresschritten,
- Pkw- und Lkw-Neuzulassungen in Deutschland (dazu entsprechende Abmeldungen),
- Fokus auf die Fahrzeugkomponenten Lithium-Ionen-Batterie, Elektromotor und Brennstoffzelle,
- Fokus auf Energieversorgungsinfrastrukturen für E-Fahrzeuge: private und öffentliche Pkw- und Lkw-Ladepunkte, Umspannwerke für Lade-Hubs, Wasserstoff-Tankstellen, Unterwerke für Oberleitungen, Oberleitungs-Anlagen,
- Komponenten von PV- und Windkraftanlagen für erneuerbaren Strom sowie für Elektrolyseure zur Wasserstofferzeugung.

Zusammenfassend können aus der Arbeit die folgenden wesentlichen Schlussfolgerungen gezogen werden:

- **In allen Szenarien steigt der jährliche Bedarf an Batteriekapazität stark an.** Im reinen „BEV“-Szenario wächst der jährliche Bedarf an Batteriekapazität für Antriebsbatterien von Pkw und Lkw zusammen von 2020 bis 2030 rasant von 15 GWh auf 210 GWh an und steigt in den Folgejahren bis 2035 weiter auf 270 GWh.
- **Haupttreiber für die Entwicklung sind dabei die Neuzulassungen batterieelektrischer Pkw.** Zwar haben Lkw deutlich größere Batteriesysteme verbaut, die hohen Stückzahlen der Pkw-Neuzulassungen sind allerdings ausschlaggebend für die Gesamtnachfrage an Batteriesystemen.

Dies gilt auch für alternative Lkw-Szenarien: Sowohl Lkw vom Antriebstyp FCEV und O-BEV werden zwar mit weniger Batteriekapazität bestückt, allerdings sind die Stückzahlen und damit verbunden Einsparpotenziale bei einer gemeinsamen Betrachtung mit Pkw relativ gering. Hinzukommt, dass rein batterieelektrische Lkw aller Voraussicht nach auch bei Vorhandensein alternativer Optionen wie FCEV und O-BEV sehr konkurrenzfähig sind und daher auch in diesen Szenarien eine wichtige Rolle spielen.

- **Der Lithiumbedarf für Batterien** in neu zugelassenen Fahrzeugen in Deutschland steigt von gut 1.000 t Lithium in 2020 auf gut 25.000 t im Jahr 2035 an. Ab 2035 bleibt die Nachfrage auf einem

stabilen Niveau oder zeigt eine leichte Abnahme. Dies resultiert aus einem höheren Marktanteil von LFP-basierten Batteriesystemen, welche pro kWh geringfügig weniger Lithium benötigen. Basierend auf den kleineren in FCEV und O-BEV Fahrzeugen verbauten Batterien geht der Bedarf nach Lithium in den Szenarien mit Antriebsmix leicht zurück. 2040 sind dies im „BEV+FCEV“-Szenario etwa 1.200 Tonnen pro Jahr und etwa 700 Tonnen pro Jahr im „BEV+O-BEV“-Szenario im Vergleich zum „BEV“ Szenario.

- **Der Rohstoffbedarf für die weiteren Schlüsselmaterialien** steigt vor allem bis 2035 mit dem Hochlauf der Elektromobilität steil an: bei Nickel von deutlich weniger als 10.000 Tonnen im Jahr 2020 auf fast 110.000 Tonnen im Jahr 2035, bei Kobalt von rund 2.000 Tonnen im Jahr 2020 auf rund 23.000 Tonnen im Jahr und bei Graphit von rund 10.000 Tonnen im Jahr 2020 auf gut 240.000 Tonnen im Jahr 2035. Bei Kobalt zeichnet sich nach 2035 aufgrund Veränderungen der Batteriezusammensetzungen ein Rückgang des jährlichen Bedarfs ab.
- **Das Pkw-Teilsegment ist im Vergleich zum Lkw-Teilsegment bei den Rohstoffbedarfen für die Batteriematerialien dominierend.** Dies gilt auch für den Bedarf an Permanentmagneten und Seltenen Erden für die Elektromotoren.
- **Der Platinbedarf für die Brennstoffzellen-Lkw** stellt aus Sicht der Rohstoffversorgung keine ernste Herausforderung dar, da mit dem Hochlauf der neuen Antriebssysteme der Platinbedarf für Autoabgaskatalysatoren stark zurückgeht und gleichzeitig durch die eingespielten Recycling-systeme für Platin aus Autoabgaskatalysatoren eine robuste Sekundärplatinquelle zur Verfügung steht. Außerdem decken auch in den FCEV-Szenarien BEV-Lkw aufgrund ihrer Konkurrenzfähigkeit wesentliche Teile des Verkehrs ab.
- **Der zusätzliche Rohstoffbedarf für Ladeinfrastruktur, Oberleitungssysteme und zugehörige Umspannwerke sowie zusätzliche Erzeugungskapazitäten für regenerativen Strom** (PV- und Windenergieanlagen) sind zwar nicht marginal, jedoch im Vergleich zu den Rohstoffbedarfen der Fahrzeugkomponenten (Lithium-Ionen-Batterien, Elektromotoren, Brennstoffzellen) von geringerer Relevanz.
- **Für alle Schlüsselrohstoffe, die für die Antriebswende benötigt werden, bestehen keine physischen Limitierungen von Seiten der natürlichen Reserven.** Es bestehen jedoch für weite Teile der Wertschöpfungsketten für Lithium-Ionen-Batterien und Elektromotoren starke Länderkonzentrationen auf der Anbieterseite (vor allem durch die VR China). Gleichzeitig erfordert der fulminante Hochlauf der globalen Elektromobilität einen steilen Hochlauf der globalen Produktionskapazitäten auf allen Ebenen der Wertschöpfungsstufen.
- **In einer gemeinsamen Betrachtung von Klimaschutzpotenzial und Ressourcenbedarf zeigt sich, dass die Elektrifizierung des Lkw-Verkehrs große Treibhausgasminderungen bei vergleichsweise geringen zusätzlichen Rohstoffbedarfen mit sich bringt.** Eine vollständige Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs würde rund ein Drittel der verkehrsbedingten Emissionen einsparen. Nötig wäre dafür aber nur rund ein Sechstel der insgesamt zur Elektrifizierung nötigen Batteriekapazität.

Folgende Empfehlungen können aus den Ergebnissen der Studie abgeleitet werden:

Stärkere Rohstoffversorgung aus natürlichen Vorkommen innerhalb der EU sowie Stärkung der gesamten Wertschöpfungskette für Lithium-Ionen-Batterien in Europa

In Europa hat die wachsende Besorgnis hinsichtlich einer sicheren Versorgung mit strategischen Rohstoffen und stabilen Wertschöpfungsketten im Frühjahr 2023 zum Entwurf der EU-Kommission zum Critical Raw Materials Act geführt [CRMA 2023]. Darin wird für strategische Rohstoffe eine Quote für eine Rohstoffgewinnung von 10 % und für die Verarbeitungskapazität entlang der Wertschöpfungskette von 40 % bis 2030 gefordert. Nach jüngsten Meldungen wollen die EU-Mitgliedsstaaten das 40 %-Ziel gar auf 50 % bis 2030 anheben [Packroff 2023].

Lithium-Ionen-Batterien werden durch den Critical Raw Materials Act deutlich adressiert, da Lithium, Nickel, Mangan und Graphit (alle jeweils in Batteriequalität), Kobalt und Kupfer im Anhang I zu [CRMA 2023] explizit als strategische Rohstoffe aufgeführt sind. Da bis auf nennenswerte Minenproduktionen an Kupfer und etwas Nickel derzeit keine relevanten Mengen an den genannten Schlüsselrohstoffen in der EU aus natürlichen Vorkommen gewonnen werden [SKN 2023], wird empfohlen die Ziele des Critical Raw Materials Act hinsichtlich einer stärkeren Rohstoffgewinnung aus Vorkommen innerhalb der EU ambitioniert zu unterstützen. Vor allem für eine zukünftige Rohstoffgewinnung von Lithiumsalzen sind in zahlreichen Ländern der EU diverse Projekte aktuell in unterschiedlichen Projektphasen aktiv. Über entsprechende unternehmerische Aktivitäten wird u. a. aus Finnland [Keliber 2023], Österreich [European Lithium 2020], Frankreich, [Imerys 2022, Eramet 2023], Portugal [Savannah resources 2023] und Spanien [Stockhead 2021] berichtet.

Aber auch in Deutschland sind Unternehmen in Projekten involviert, um natürliche Lithiumvorkommen zukünftig auszubeuten. Hier sind sowohl Projekte aus dem Erzgebirge, die auf klassischen bergmännischen Abbau der lithiumhaltigen Erze setzen [Zinnwald 2023] als auch die geplante Gewinnung von Lithiumsalzen aus dem großen Reservoir an Tiefenthalwasser aus dem Oberrheingraben zu nennen. Letzteres plant in Kombination mit Geothermie über neuartige Sorptionsverfahren eine Gewinnung von Lithiumsalzen im industriellen Maßstab bis zum Jahr 2025 [Vulcan Energy 2023].

Die DERA BGR hält nach unterschiedlichen Szenarien eine Eigenversorgungsquote der EU an Lithium bis 2030 von 30 % für möglich, wenn ausreichend Minenprojekte in der EU realisiert werden und Recyclingpotenziale für Lithium erschlossen werden [Al Barazi 2022]. Es wird daher empfohlen, im Rahmen der Möglichkeiten des Ressorts und in Abstimmung mit der Bundesregierung und der Europäischen Kommission alle zielführenden Maßnahmen zu ergreifen, um dieses ambitionierte Ziel bzgl. der Lithiumversorgung robust zu unterstützen. Weiterhin wird im Sinne des Critical Raw Materials Acts empfohlen, auch den Aufbau und die Errichtung von Weiterverarbeitungskapazitäten für Lithiumverbindungen in Batteriequalität („Lithiumraffinerien“) sowie die Stärkung von weiteren Stufen der Wertschöpfungskette (Kathoden und Anodenmaterialproduktion, Produktion von Lithium-Ionen-Zellen – „Gigafactories“) sowohl in Deutschland als auch in Partnerländern der EU zu unterstützen [SKN 2023]. Hier kann für ausgewählte Investitionsprojekte das europäische Instrument der IPCEI für die Auslösung größerer Investitionen genutzt werden [IPCEI Batteries 2023]. Hier sind bereits 14 Deutsche Projekte bewilligt (Summer-IPCEI und Autumn-IPCEI bzw. EuBatIn), die eine ökonomisch und ökologisch nachhaltige und technologisch souveräne Abdeckung der Wertschöpfungskette Batterie mit dem Aufbau eigener Kapazitäten für die Batterieproduktion in Deutschland zum Ziel haben. Inhaltlich kann dabei die gesamte Wertschöpfungskette, von der Ressourcengewinnung, Materialraffinerie und -synthese über die eigentliche Batteriezellfertigung und Nutzung der Batterien in Produkten bis hin zu Recycling und Zweitverwendung berücksichtigt werden.

Eine Erweiterung der beiden Batterie-IPCEIs kann in Zukunft jedoch sinnvoll sein, um Lücken in der Wertschöpfungskette zu adressieren.

Stärkere Diversifizierung der Lieferländer von Rohstoffen und Schlüsselkomponenten für Lithium-Ionen-Batterien

Eine komplette Eigenversorgung der EU bzgl. der wesentlichen Stufen der Wertschöpfungskette für Lithium-Ionen-Batterien ist auf absehbare Zeit weder realistisch möglich noch unbedingt nötig. In Ergänzung zu einer oben geschilderten Empfehlung die Wertschöpfungskette innerhalb der EU zu stärken, wird eine stärkere Diversifizierung der Lieferländer von außerhalb der EU im Sinne eines „De-Risking“ empfohlen. Hier bieten sich z. B. für die Lithiumversorgung bestehende Partnerländer wie Chile oder Brasilien, aber auch neue Partnerländer wie beispielsweise Kanada, Ghana oder Namibia an [SKN 2023]. Es wird empfohlen hier Partnerschaften im Rohstoff-, Technologie- sowie Bildungs- und Forschungsbereich massiv auszuweiten.

Konsequente Erschließung von Recyclingpotenzialen für Schlüsselrohstoffe für Lithium-Ionen-Batterien

Im vorangegangenen Abschnitt wurde herausgearbeitet, dass sich in den nächsten Jahren über das Jahr 2030 und 2035 bis 2040 und darüber hinaus ein deutlich wachsendes Sekundärrohstoffpotenzial für wichtige Schlüsselrohstoffe wie Lithium, Kobalt, Nickel und Kupfer aufbaut, dass es zur Stärkung der Wertschöpfungskette in Deutschland bzw. der EU möglichst effizient zu erschließen gilt. Die Erschließung dieses wachsenden Recyclingpotenzials kann mittel- und langfristig maßgeblich zu einer stärkeren Unabhängigkeit Europas bzgl. der Schlüsselversorgung mit strategischen Rohstoffen wie Lithium beitragen. Es wird aus diesen Gründen nachdrücklich empfohlen die Umsetzung der Vorgaben der neuen EU Battery Regulation [BatReg 2023] in Deutschland sicherzustellen.

Hier sind in den letzten Jahren noch wichtige Arbeiten zu delegierten Rechtsakten zu unterstützen, welche die zahlreichen Vorgaben der neuen EU Battery Regulation noch konkretisieren müssen. Das BMWK und weitere Bundesressorts haben bereits seit vielen Jahren durch Förderung umfassender Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien zu technologischen Innovationen bei diesen anspruchsvollen Verfahren beigetragen und die entsprechende Unternehmenslandschaft in Deutschland gestärkt (vgl. z. B. [Sojka et al 2023]). Entsprechend sind inzwischen eine zunehmende Zahl von Unternehmen mit unterschiedlichen Verfahren auf verschiedenen Stufen der Recyclingkette aktiv und investieren zunehmend in die Ausweitung notwendiger Aufbereitungs- und Recyclingkapazitäten.

Stärkung der gesamten Wertschöpfungskette für Permanentmagnete für Elektromotoren in Europa

Wie in den vorangegangenen Abschnitten klar herausgearbeitet wurde, sind neben den Lithium-Ionen-Batterien die Elektromotoren mit Permanentmagneten (Neodym-Eisen-Bor-Magnete) die für die Antriebswende zweite strategische Wertschöpfungskette, die es für Deutschland bzw. Europa unbedingt zu stärken gilt. Im Vergleich zur Wertschöpfungskette Lithium-Ionen-Batterien wo durch massive Aktivitäten der Bundesregierung und der EU (auch finanzieller Art) deutliche Investitionen innerhalb der EU bereits angeschoben wurden [SKN 2023, Peter et al. 2022], besteht für die Wertschöpfungskette der Permanentmagnete noch besonders dringend Handlungsbedarf [ERMA 2021].

Sowohl der Entwurf zum Critical Raw Materials Act [CRMA 2023] als auch der kürzlich von der Europäischen Kommission vorgelegte Entwurf zur Revision der Europäischen Altfahrzeug-Richtlinie

[EC 2023] adressieren sehr nachdrücklich die Stärkung der Wertschöpfungskette der Permanentmagnete. In diesen Entwurfsdokumenten der Europäischen Kommission sind zahlreiche Vorschläge für eine Stärkung der Wertschöpfungskette der Seltenen Erden bzw. der Permanentmagnete enthalten wie z. B. eine Ausbaupflicht von Elektromotoren aus End-of-Life-Fahrzeugen (als erster notwendiger Schritt für eine Verwertung der Permanentmagnete) und mögliche Recyclingquoten sowie Recycled Content-Quoten für Sekundärmaterial in neuen Permanentmagneten. Es wird empfohlen, dass die Bundesregierung in den nächsten Monaten und Jahren im Rahmen der Trilog-Verfahren die weitere Ausarbeitung und zügige Realisierung dieser wichtigen rechtlichen Rahmenbedingungen maßgeblich unterstützt. Nach [ERMA 2021] besteht das Ziel, die Produktionskapazität für Neodym-Bor-Magnete in der EU von heute rund 1.000 Jahrestonnen auf 7.000 Jahrestonnen zu erhöhen bis zum Jahr 2030. Dies würde für den dann deutlich höheren Bedarf der EU rund 20 % Eigenversorgung bedeuten.

Stärkere Diversifizierung der Lieferländer von Rohstoffen und Schlüsselkomponenten für Permanentmagnete

Ebenso wie bei der Wertschöpfungskette der Lithium-Ionen-Batterien gilt es bei der Wertschöpfungskette der Permanentmagnete für Elektromotoren ebenfalls die Diversifizierung der Lieferländer außerhalb der EU deutlich auszuweiten, um die sehr starke Dominanz der VR China hier zu reduzieren. Da in zahlreichen Ländern natürliche Vorkommen in größeren Mengen vorhanden sind, wird empfohlen mit ausgewählten Partnerländern hier in den nächsten Jahren Rohstoff- und Technologiepartnerschaften abzuschließen. Wichtige Kriterien für die Auswahl dieser Partnerländer sind u. a. möglichst bereits weit gediehene Projekte, eine gute Governance und vorteilhafte logistische Anbindungen wie vorhandene Seehäfen, Straßen- und Schieneninfrastruktur usw. In [SKN 2023] werden entsprechend Länder wie Australien, Kanada, Kolumbien, Malawi und Namibia für den Bereich der Seltenen Erden empfohlen.

Maßnahmen zur Reduzierung der Batteriegrößen

Es sollten zukünftig Energieeffizienzstandards für BEV-Fahrzeuge ausgearbeitet und eingeführt werden, die den Stromverbrauch je 100 km adressieren. Damit könnten mit kleineren und damit weniger rohstoffintensiven Batterien die gleichen Reichweiten erzielt werden. Im Bereich des Beschaffungswesens des Bundes könnten hier zusätzlich Impulse zur Anschaffung weniger rohstoffintensiver Modelle gelegt werden. Weiterhin ist der forcierte Ausbau der Ladeinfrastruktur – und hier vor allem der Schnellladeinfrastruktur – eine wichtige flankierende Maßnahme, um der sogenannten „Reichweitenangst“ zu begegnen und den Trend zu kleineren und damit weniger rohstoff- und auch weniger kostenintensiven Antriebsbatterien zu unterstützen.

Forcierung der Verkehrswende neben der Antriebswende

Die in dieser Studie aufgestellten und im Detail ausgewerteten Szenarien fokussieren ausschließlich auf die Antriebswende als wichtiger Teil der Verkehrswende. Die Ergebnisse zeigen jedoch deutlich, dass der Anstieg der Nachfrage nach Schlüsselkomponenten und Rohstoffen nicht zuletzt von der Stückzahl der jeweiligen Fahrzeuge abhängt. Pkw tragen dazu in besonderem Maße bei. Es wird daher – ungeachtet der hier formulierten Beiträge zur Stärkung der Antriebswende – nachdrücklich empfohlen, zusätzlich Maßnahmen zur Stärkung des öffentlichen Personen- und Güterverkehrs zu unterstützen. Eine Steigerung des öffentlichen Personenverkehrs sowie Maßnahmen zur Stärkung des Güterverkehrs auf der Schiene können wichtige Bausteine zur Dämpfung von Nachfragespitzen sowohl bzgl. Rohstoffen als auch bei elektrischer Energie sein.

1 Einführung

Der Hochlauf der Elektromobilität im Pkw-Bereich in Deutschland hat in den letzten Jahren deutlich an Dynamik gewonnen. Zusätzlich zeichnet sich, unterstützt durch regulatorische Rahmenbedingungen und technische Innovationen in der Batterie- und Antriebstechnik, auch für den Nutzfahrzeugbereich bis hin zu schweren Lastkraftwagen ein wachsender Marktanteil neuer Antriebssysteme in den nächsten Jahren ab. Der Verbrauch überwiegend fossiler Treibstoffe (Benzin- und Dieselmotoren) und die damit verbundenen enormen Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Straßenfahrzeuge werden entsprechend in den nächsten 10 bis 20 Jahren deutlich zurückgehen.

Im Zuge der Transformation der Antriebssysteme für Straßenfahrzeuge sind Diskussionen und Fragen zur Verfügbarkeit und verlässlichen Versorgung mit Schlüsselrohstoffen wie z. B. Lithium für die Antriebsbatterien zunehmend in den Fokus gerückt. Durch den Krieg Russlands gegen die Ukraine haben Untersuchungen zur Verlässlichkeit globaler Wertschöpfungsketten – ausgehend im ersten Schritt von der Gewinnung natürlicher Rohstoffe – zusätzliche Brisanz und Dringlichkeit erhalten.

Es werden vor allem kurz- bis mittelfristig Risiken bei der Verfügbarkeit von Schlüsselmaterialien für die Elektromobilität gesehen. Während sich bei Pkw bereits eine Dominanz batterieelektrischer Antriebe abzeichnet, sind im Straßengüterverkehr die Technologiewahl bzw. deren Anteile im Markt (Batterie, Oberleitung, Brennstoffzelle) für die Erreichung der Klimaschutzziele noch nicht endgültig absehbar. Versorgungsrisiken bei Schlüsselmaterialien werden in diesem Kontext bisher aber nicht tiefergehend diskutiert und es fehlt eine belastbare Grundlage mit Blick auf deren Relevanz im Verhältnis zur Elektrifizierung von E-Pkw. Diese Studie möchte für eine fundierte Debatte eine fachliche Grundlage bilden und sowohl den beschleunigten Markthochlauf der Elektromobilität im Pkw-Sektor (vgl. Koalitionsvertrag der Bundesregierung) als auch die verfügbaren Technologieoptionen im Lkw-Bereich aus einer Ressourcenperspektive betrachten. Andere Fahrzeuge mit alternativen Antrieben wie Busse, Pedelecs, Züge etc. wurden im Rahmen dieser Studie nicht adressiert. Aus anderen Arbeiten ist bekannt, dass die Nachfrage nach Schlüsselkomponenten und Rohstoffen aus diesen Fahrzeugsegmenten gegenüber dem Pkw-Sektor und Lkw-Sektor als gering einzustufen sind [SKN 2023].

Um ein umfassendes Bild zu erhalten, wurden die absehbar mit der Transformation der Antriebe verbundenen Entwicklungen auf der Nachfrageseite intensiv untersucht und mit der Situation und möglichen Entwicklungen auf der Angebotsseite für die benötigten Rohstoffe, Komponenten und Technologien detailliert abgeglichen. Auf mögliche Schwachstellen bzw. Dysbalancen im dynamischen Spiel der Nachfrageseite mit der Angebotsseite wird explizit eingegangen. Die Studie schließt mit konkreten Empfehlungen zur Stärkung der erforderlichen Wertschöpfungsketten für den Hochlauf der neuen Antriebssysteme für Straßenfahrzeuge in Deutschland.

Die vorliegende Studie geht davon aus, dass für das Ziel der Klimaneutralität eine Antriebswende im Pkw- und Lkw-Sektor ohne Alternative ist. Die Studie will vielmehr wichtige Handlungsbedarfe aufzeigen, um die Rohstoff- bzw. Komponentenversorgung für die Antriebswende robust und dauerhaft abzusichern.

2 Methodisches Vorgehen

Methodischer Kern der Studie ist ein umfassender Szenarioansatz. Konkret werden zwischen den Jahren 2020 und 2040 die mit dem Hochlauf der neuen Antriebssysteme für Pkw und Lkw verbundenen Schlüsselkomponenten wie Antriebsbatterien, Elektromotoren, Brennstoffzellen, Oberleitungen sowie die für die Elektrifizierung der Antriebstränge notwendige Lade- und Energieinfrastruktur über Szenarien quantifiziert und die Ergebnisse für den Bedarf an Komponenten und ausgewählten Schlüsselrohstoffen wie Lithium, Kobalt, Seltene Erden usw. in Fünfjahresschritten dargestellt. Nicht zuletzt die Ergebnisse in der mittelfristigen Perspektive (2025, 2030, 2035) sind von besonderem Interesse – aufgrund der im vorherigen Abschnitt geschilderten bereits eingesetzten signifikanten Dynamik der Antriebswende im Straßenpersonen- und Straßengüterverkehr.

Für die Zusammenstellung der notwendigen Daten und Informationen konnte das Öko-Institut auf eine Reihe von vorangegangenen eigenen Arbeiten, die Teilaspekte adressiert hatten, zurückgreifen. Zur Komplettierung und Aktualisierung der Daten und Informationen wurde weiterhin eine umfassende Quellenrecherche – mit Schwerpunkt auf aktuelle Quellen durchgeführt. Zur Absicherung der Szenarioannahmen und entsprechenden Datensätzen wurden zwei Stakeholder-Workshops (Online) am 15. März 2023 und am 25. Juli 2023 durchgeführt. Im Rahmen dieser Workshops konnten mit Hilfe der beteiligten Fachleute aus Wirtschaft, Ministerien, Behörden, Wissenschaft und Zivilgesellschaft die Szenarioannahmen und die entsprechenden Datengerüste validiert und in einigen Fällen optimiert und abgesichert werden. Der Partner ifeu-Institut war verantwortlich für die unabhängige Qualitätssicherung des vorliegenden Berichts.

2.1 Definitionen der Szenarien

Die in dieser Studie verwendeten Szenarien basieren auf eigenen Markthochlauf-Modellierungen. In der Modellierung wird eine Vielzahl von Nutzungsprofilen abgebildet, in denen auf Basis von Berechnungen der Gesamtnutzungskosten der günstigste Antrieb gewählt wird. Für Pkw basiert die Antriebswahl zusätzlich auf Kalibrierungsfaktoren historischer Neuzulassungen. Die wesentliche Ziel- und Rahmensetzung wird im Folgenden für Pkw und Lkw vorgestellt. Die Szenarien bilden jeweils im Kern einen plausiblen Hochlauf ab. Es handelt sich jedoch keinesfalls um Prognosen der Forschungsnehmer. Die Szenarien wurden nicht zuletzt so gewählt, um die Fragen für den notwendigen Rohstoffbedarf auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 beantworten zu können.

2.1.1 Definition Pkw-Szenarien

Für den Pkw-Markt stellt die Markthochlauf-Modellierung ein Zielszenario dar, welches sich an zwei zentralen Zielgrößen orientiert: (1) Laut Koalitionsvertrag will die Bundesregierung bis zum Jahr 2030 rund 15 Millionen vollelektrische Pkw im Bestand erreichen [KoaV 2021] und (2) ab 2035 sollen nach Vorgabe der EU nur noch emissionsfreie Pkw und leichte Nutzfahrzeuge neu zugelassen werden [EU 2023].

Das verwendete Szenario stellt eine Aktualisierung aus der Studie *Klimaneutrales Deutschland 2045* dar unter Berücksichtigung der oben genannten Zielmarken [SKN 2023]. Als weitere Änderung wurden die zur Erreichung der Klimaschutzziele notwendigen Verlagerungen auf klimaschonende Transportmittel (ÖPNV, Schiene) in dieser Studie bewusst nicht berücksichtigt, um den Rohstoffbedarf für Elektrofahrzeuge im Falle eines vollständigen Antriebswechsels der Fahrzeugflotten in einem konservativen Ansatz auszuweisen. Die Neuzulassungen von Pkw bleiben daher in Summe ab dem Jahr 2035 konstant. Folglich sind Anstrengungen zur Verringerung des motorisierten

Individualverkehrs ein direkter Hebel, die in dieser Studie ausgewiesenen Rohstoffbedarfe zu reduzieren.

In der Modellierung werden drei Größenklassen von Pkw unterschieden: (1) „klein“, (2) „mittel“ und (3) „groß“. Tabelle 2-1 gibt die Zuordnung der Größenklassen zu den offiziellen Segmenten des Kraftfahrt Bundesamtes (KBA) an. Zudem werden diverse Antriebssysteme abgebildet. Diese Studie fokussiert auf Fahrzeuge, die rein elektrische Kilometer zurücklegen können, also batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Plug-in Hybrid-Fahrzeuge (PHEV) und Vollhybrid-Fahrzeuge (Voll-HEV).

2.1.2 Definition Lkw-Szenarien

Die Lkw-Szenarien basieren auf den im Forschungsprojekt *StratES: Strategie zur Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs* entwickelten Markthochlauf-Modellierungen [Göckeler et al. 2023]. Darin werden verbleibende Unsicherheiten bezüglich eines möglichen Antriebsmixes im Schwerlastverkehr anhand von drei Technologiepfaden berücksichtigt: (1) „BEV“: ein reiner Hochlauf von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen, (2) „BEV+FCEV“: eine Kombination aus batterieelektrischen Nutzfahrzeugen und Brennstoffzellenantrieben und (3) „BEV+O-BEV“: ein Mix aus batterieelektrischen Nutzfahrzeugen und vollelektrischen Oberleitungs-Lkw, welche dynamisch während der Fahrt über Oberleitungssysteme mit Strom versorgt werden können.

Für jeden Technologiepfad wurden in mehreren Szenarien wesentliche Stellhebel auf den Markthochlauf untersucht, wie zum Beispiel die Ausgestaltung einer CO₂-basierten Lkw-Maut, die Verfügbarkeit öffentlicher Energieversorgungsinfrastrukturen sowie verschiedene Energiepreisentwicklungen. Nähere Informationen und Ergebnisse hierzu können [Göckeler et al. 2023] entnommen werden. In dieser Studie fokussieren wir auf den drei Hauptszenarien, die begünstigt durch die in der Zwischenzeit beschlossene CO₂-basierte Lkw-Maut [BReg 2023] sowie einer mittelfristigen, bedarfsorientierten Verfügbarkeit von Energie-Infrastrukturen eine rasche Marktdurchdringung elektrischer Antriebe im Straßengüterverkehr projizieren.

In der Modellierung werden leichte Nutzfahrzeuge sowie vier Größenklassen schwerer Nutzfahrzeuge unterschieden (anhand des zulässigen Gesamtgewichts): (1) Lkw von 3,5 bis 7,49 Tonnen, (2) Lkw von 7,5 bis 11,99 Tonnen, (3) Lkw ab 12 Tonnen und (4) Last- und Sattelzüge (LSZ). Da in den Szenarien lediglich für die schwerste Größenklasse der Last- und Sattelzüge Unterschiede in der Antriebsentwicklung auftraten, wird in dieser Studie nur in dieser Größenklasse zwischen den elektrischen Antrieben unterschieden: (1) batterieelektrisch (BEV), (2) Brennstoffzellenantrieb (FCEV) und (3) vollelektrischer Oberleitungsantrieb (O-BEV). In den anderen Größenklassen wird von einem batterieelektrischen Antrieb ausgegangen.

2.2 Definition der Systemgrenzen

Die Systemgrenzen für die Szenarien, die in dieser Studie aufgestellt und ausgewertet werden, können wie folgt konkretisiert werden:

- Zeitrahmen 2020 bis 2040, Ergebnisdarstellung in Fünfjahresschritten,
- Pkw- und Lkw-Neuzulassungen in Deutschland (dazu entsprechende Abmeldungen),
- Fokus auf die Fahrzeugkomponenten Lithium-Ionen-Batterie, Elektromotor und Brennstoffzelle,
- Fokus auf Energieversorgungsinfrastrukturen für E-Fahrzeuge: private und öffentliche Pkw- und Lkw-Ladepunkte, Umspannwerke für Lade-Hubs, Wasserstoff-Tankstellen, Unterwerke für Oberleitungen, Oberleitungs-Anlagen,

- Komponenten von PV- und Windkraftanlagen für erneuerbaren Strom sowie für Elektrolyseure zur Wasserstofferzeugung.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Details zu den relevanten Schlüsselkomponenten und Infrastrukturen, die für die Szenarien berücksichtigt wurden, dokumentiert.

2.3 Beschreibung der Schlüsselkomponenten der Fahrzeuge

2.3.1 Lithium-Ionen-Batterien

Lithium-Ionen-Batterien haben sich als Standardbatterietechnologie für Elektrofahrzeuge etabliert. Für die Quantifizierung der Rohstoffbedarfe von Lithium-Ionen-Batterien für die zukünftigen Fahrzeugflotten wird in einem ersten Schritt eine repräsentative Batteriegröße je Fahrzeug-Größenklasse definiert. Eine Übersicht der angenommenen Batteriekapazitäten bietet Tabelle 2-1. Für Pkw entsprechen die angegebenen Batteriekapazitäten in etwa dem Marktdurchschnitt der im Jahr 2021 neu zugelassenen Elektrofahrzeuge¹.

Für schwere Nutzfahrzeuge steht die Marktentwicklung, mit den ersten Serienfahrzeugen mit Batteriekapazitäten mit überwiegend bis zu 500 kWh, noch am Anfang [Göckeler et al. 2023]. Die Batteriekapazitäten leiten sich hier daher aus dem für das Jahr 2030 projizierten Energieverbrauch ab, wobei als Puffer eine Restladung der Batterie von 15 % berücksichtigt wird. Zudem wird zwischen drei Reichweiten zwischen 200 und 600 Kilometer unterschieden, die über den numerischen Wert hinter dem Antriebskürzel angegeben werden: BEV200, BEV400 und BEV600. Expert*innen schätzen die so ermittelten Batteriegrößen im Review als konservativ ein und rechnen mit kleiner dimensionierten Batteriespeichern für die kommenden Lkw-Generationen. Aufgrund verbleibender Unsicherheiten und dem übergeordneten Studienziel im Zweifelsfall eher maximale Rohstoffbedarfe aufzuzeigen, wurden die Annahmen wie aufgeführt für die Quantifizierung beibehalten.

¹ Auf Basis von Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes (www.kba.de) und des ADAC (www.adac.de)

Tabelle 2-1: Annahmen zur Batteriekapazität je Fahrzeugklasse

Größenklasse	Pkw klein	Pkw mittel	Pkw groß / Leichte Nutzfahrzeuge
Segmente nach KBA	Mini, Kleinwagen	Kompaktklasse, Mini-Vans	Mittel-, obere Mittelklasse, Sportwagen, SUVs etc.
Antrieb	BEV	BEV	BEV
Batteriekapazität (kWh)	40	70	80
Größenklasse (nach Gesamtgewicht)	Lkw 3,5-7,49 Tonnen	Lkw 7,5-11,99 Tonnen	Lkw ab 12 Tonnen
Antrieb	BEV	BEV	BEV
Batteriereichweite (km)	200-600	200-600	200-600
Batteriekapazität (kWh)	130-380	210-630	290-860
Größenklasse	Last- und Sattelzüge	Last- und Sattelzüge	Last- und Sattelzüge
Antrieb	BEV	FCEV	O-BEV
Batteriereichweite (km)	200-600		200
Batteriekapazität (kWh)	430-1.300	100	300

Quelle: Eigene Annahmen basierend auf ADAC, KBA und [Göckeler et al. 2023]

Die verschiedenen Lithium-Ionen-Batterie-Typen unterscheiden sich vor allem durch das verwendete Aktivmaterial auf der positiven Elektrode, das Kathodenmaterial. Danach werden sie dementsprechend in Tabelle 2-2 gegliedert.

Die verschiedenen Kathodenmaterialien² sind essenziell, wenn es um die Performanz der Batteriezellen und vor allem die eingesetzten Rohstoffe geht. Während sie alle einen relativ ähnlichen Anteil an Lithium enthalten, unterscheidet sich der Anteil an Nickel, Kobalt und Mangan sehr stark. Lithiumeisenphosphat-Batterien (LFP-Batterien) enthalten keinen der drei Rohstoffe. Bei NMC gibt die Zahl dahinter den Anteil an Nickel, Mangan bzw. Kobalt im Kathodenmaterial an.

Die Annahmen zu Marktanteilen der besagten Batterietypen in Tabelle 2-2 basieren auf aktuellen Projekten, einer Literaturrecherche und zusätzlichen Expert*innen-Gesprächen. Ein generell zu beobachtender Trend ist ein wachsender Anteil an LFP, vor allem in den kleineren Fahrzeugen, bei denen keine großen Reichweiten von Nöten sind. Darüber hinaus nimmt der Nickelanteil in NMC-Batterien immer weiter zu, da dies zu höheren Energiedichten und verringerten Kosten pro kWh führen kann. Gleichzeitig führt dies zu einer größeren Instabilität des Kathodenmaterials, welcher durch andere Maßnahmen (z. B. stabilisierende Beschichtungen) entgegengewirkt werden muss.

² Aktuell gängige Kathodenmaterialien sind Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid in verschiedenen Zusammensetzungen ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$, mit $x+y+z=1$, z. B. NMC 111, NMC 622 oder NMC 811), Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid ($\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$, NCA), Lithium-Eisen-Phosphat (LiFePO_4 , LFP), Lithium-Mangan-Oxid (LiMn_2O_4 , LMO)

Tabelle 2-2: Annahmen zu Marktanteilen von Batterietypen für verschiedene Fahrzeugklassen in Prozent

Größenklasse	Batterietypen	2020	2025	2030	2035	2040
Pkw klein / mittel	LFP	6	14,3	22,6	30,9	39,2
	NMC111	5	4	3	2	1
	NMC622	53	42,4	31,8	21,2	10,6
	NMC811	13	19,9	26,8	33,7	40,6
	NCA	20	17	14	11	8
	LMO	3	2,4	1,8	1,2	0,6
Pkw groß	LFP	6	9,8	13,6	17,4	21,2
	NMC111	5	4	3	2	1
	NMC622	53	42,4	31,8	21,2	10,6
	NMC811	13	24,4	35,8	47,2	58,6
	NCA	20	17	14	11	8
	LMO	3	2,4	1,8	1,2	0,6
LNF	LFP	29	35,2	41,4	47,6	53,8
	NMC111	5	4	3	2	1
	NMC622	53	42,4	31,8	21,2	10,6
	NMC811	13	18,4	23,8	29,2	34,6
Lkw 3,5 - 7,49 Tonnen	LFP	100	100	100	100	100
	NMC622	0	0	0	0	0
	NMC811	0	0	0	0	0
Lkw 7,5 - 11,99 Tonnen	LFP	80	80	80	80	80
	NMC622	20	20	20	20	20
	NMC811	0	0	0	0	0
Lkw ab 12 Tonnen	LFP	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7
	NMC622	21,7	21,7	21,7	21,7	21,7
	NMC811	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7
Last- und Sattelzüge	LFP	50	50	50	50	50
	NMC622	30	30	30	30	30
	NMC811	20	20	20	20	20
FCEV	NMC811	100	100	100	100	100
OBEV	LFP	40	40	40	40	40
	NMC622	35	35	35	35	35
	NMC811	25	25	25	25	25

FCEV = Brennstoffzellenfahrzeug, OBEV = Oberleitungs-Lkw, LNF = leichte Nutzfahrzeuge, NMC = Nickel-Mangan-Kobalt, LFP = Lithium-Eisen-Phosphat, NCA = Nickel-Kobalt-Aluminium, LMO = Lithium-Mangan-Oxid

Quelle: eigene Annahmen basierend auf aktuellen Marktanteilen, Produktionsankündigungen und Benchmark Minerals

Aus den Batterietypen und den angenommenen Größen wurden basierend auf dem BatPaC-Modell des Argonne National Lab die Bedarfe der zentralen Schlüsselrohstoffe abgeschätzt. Folgende Schlüsselrohstoffe wurden dabei betrachtet:

- Lithium
- Nickel
- Kobalt
- Graphit
- Mangan
- Kupfer

Folgende Aspekte haben zur Auswahl dieser Rohstoffe beigetragen:

- Bedeutung der Elektromobilität für die Nachfrage nach diesem Rohstoff
- Kritikalität der gesamten Wertschöpfungskette (über den Rohstoff hinaus)

Weitere Informationen dazu sind in Kapitel 4.1 dargestellt.

2.3.2 Elektromotoren

Elektromotoren kommen in Fahrzeugen an verschiedenen Stellen zum Einsatz.³ In Elektrofahrzeugen macht die Leistung des Antriebsmotors und der damit verbundene Materialeinsatz jedoch bei Weitem den größten Beitrag aus, so dass in den folgenden Ausführungen auf die Antriebsmotoren fokussiert wird.⁴ Analog zum zuvor beschriebenen Vorgehen bei den Lithium-Ionen-Batterien, wird in einem ersten Schritt eine repräsentative Motorleistung je Fahrzeug-Größenklasse definiert (Tabelle 2-3). Dabei ist die Gesamtleistung für einen oder mehrere Elektromotoren im Fahrzeug angegeben. Für Nutzfahrzeuge basieren die Annahmen auf dem StratES-Projekt [Göckeler et al. 2023]. Für Pkw wurde ebenfalls das Marktmittel der im Jahr 2021 neu zugelassenen Elektrofahrzeuge gebildet auf Basis von Daten des KBA und ADAC. Allerdings zeigte sich ein hoher Anteil von hochmotorisierten Fahrzeugmodellen insbesondere in den Größenklassen „Pkw groß“ und im geringeren Maße in „Pkw mittel“. Unter der Annahme, dass sich in einem Massenmarkt ein höherer Anteil von Mittelklassewagen etablieren wird, sind einige Spitzenmodelle bei der Mittelwertbildung ausgenommen worden.

³ Z. B. Servolenkungen, Fensterheber, Lautsprecher sowie in Elektrofahrzeugen insbes. für den Antrieb.

⁴ Im weiteren Text dieser Studie ist mit dem Ausdruck „Elektromotor“ ausschließlich der elektrische Antriebsmotor zu verstehen.

Tabelle 2-3: Annahmen zur Gesamtleistung der Antriebsmotoren je Fahrzeugklasse

Größenklasse	Pkw klein	Pkw mittel	Pkw groß
Elektromotorleistung (kW)	88	125	180
Größenklasse (nach Gesamtgewicht)	Lkw 3,5-7,49 Tonnen	Lkw 7,5-11,99 Tonnen	Lkw ab 12 Tonnen
Elektromotorleistung (kW)	120	170	325
Größenklasse	Leichte Nutzfahrzeuge	Last- und Sattelzüge	
Elektromotorleistung (kW)	100	375	

Quelle: Eigene Annahmen basierend auf ADAC, KBA und [Göckeler et al. 2023]

Die weitaus meisten Elektromotoren für den Antrieb von Elektrofahrzeugen sind permanenterregte Synchronmotoren (PMSM), die Permanentmagnete mit Seltenen Erden (Neodym-Eisen-Bor-Magnete) enthalten und deren Produktion damit mit einer strategischen Wertschöpfungskette verbunden ist. Auf weitere technische Details hierzu wird in Abschnitt 3 näher eingegangen.

2.3.3 Brennstoffzellen

Brennstoffzellen-Fahrzeuge kommen in der Modellierung nur in der schwersten Fahrzeug-Klasse, den Last- und Sattelzügen (LSZ), in den Markt. Die Brennstoffzelle ist in etwa auf die halbe Motorleistung ausgelegt. Somit wird in dieser Studie eine **Brennstoffzellenleistung je LSZ in Höhe von 200 kW_{el}** angenommen. Zum Ausgleich von Spitzenlasten und als Energiespeicher für die Rekuperation sind auch in Brennstoffzellen-Lkw Batteriespeicher in Form von Lithium-Ionen-Batterien verbaut. Die angenommene **Batteriekapazität ist mit 100 kWh je Fahrzeug** deutlich geringer als für batterieelektrische Lkw (vgl. Tabelle 2-1). Der Rohstoffbedarf der Batterien wird, wie in Kap. 2.3.1 beschrieben, abgebildet.

In mobilen Anwendungen ist die PEM-Technologie bei Brennstoffzellen dominant (s. z. B. [NOW 2022]). In den Elektroden wird als Katalysator das Edelmetall Platin eingesetzt, das auch in PEM-Elektrolyseuren und in den Katalysatoren von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor verwendet wird. Um einzuordnen, inwiefern der im Szenario BEV + FCEV berechnete Hochlauf von Brennstoffzellen-LSZ zu Versorgungsengpässen bei Platin führen könnte, wird der Fokus auf dieses Element gelegt.

Basierend auf den Rückmeldungen aus dem Stakeholder-Kreis wird aufgrund der hohen Fahrleistungen von LSZ eine **aktuelle Platinbeladung 1 g/kW_{el}** sowie eine **Reduktion auf 0,35 g/kW_{el} bis zum Jahr 2040** als realistisch eingeschätzt. Die Interpolation der Entwicklung zwischen heute und 2040 erfolgt vereinfachend linear.

Zur Abschätzung des Platineinsatzes in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor wurde eine mittlere Beladung mit Platingruppenmetallen von 4 g-PGM je Pkw zugrunde gelegt, bei einem Platinanteil von 28 % [Buchert et al. 2019]. Für Lkw wird von einem höheren PGM-Bedarf ausgegangen, daher wurde hier mit der doppelten Menge (8 g-PGM je Lkw) gerechnet.

2.4 Beschreibung der Schlüsselkomponenten der Energieversorgungs- und Stromerzeugungsinfrastrukturen

2.4.1 Ladeinfrastruktur, Oberleitungssysteme und Wasserstoff-Tankstellen

Methodische Herangehensweise zur Ableitung des Zubaus an Energieversorgungsinfrastruktur

Die Bedarfsabschätzung der Ladeinfrastruktur ist stark von Annahmen getrieben. Zwar existieren bereits zahlreiche private Ladepunkte und für Pkw zusätzlich ein Netz an öffentlichen Ladepunkten⁵, aber die Projektionen enthalten einige Unbekannte. Die Aufteilung auf privates und öffentliches Laden wird von dem Nutzungsverhalten abhängen und lässt sich aufgrund der Komplexität der Einsatzprofile von Pkw und Lkw nur schwer vorhersagen. Zum anderen ist der Bedarf an Energieversorgungsinfrastrukturen an die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen gekoppelt. Entsprechend der Markthochlauf-Szenarien orientieren sich die Bedarfsabschätzungen für Pkw vor allem an angekündigten Zielen, während für Lkw differenziertere Bedarfsanalysen aus dem StratES-Projekt verwendet werden [Göckeler et al. 2023].

Für Pkw hat die Bundesregierung im Masterplan Ladeinfrastruktur für das Jahr 2030 das Ziel von einer Million öffentlicher Ladepunkte formuliert [BMDV 2022]. Die Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur geht von einem geringeren Bedarf von etwa 440.000 bis 840.000 öffentlichen Ladepunkten aus und gibt für private Ladepunkte einen Bedarf von grob 10 bis 12 Millionen Ladepunkten an Wohnorten und Arbeitsplätzen an [NOW 2020]. Für öffentliche Ladeinfrastruktur orientiert sich die Studie an den Zielen der Bundesregierung, während sie für den Zubau an privater Ladeinfrastruktur den Bedarfsabschätzungen der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur folgt. In den Jahren nach 2030 werden abnehmende Zubaubedarfe angenommen. Tabelle 2-4 zeigt den angenommenen Zubau an Pkw-Ladepunkten in drei Zeitintervallen im Zeitraum von 2020 bis 2040.

Tabelle 2-4: Bedarfsabschätzung von Energieversorgungsinfrastrukturen für E-Fahrzeuge

Zubau Lade-Infrastruktur	Einheit	2021-2030	2031-2035	2036-2040
Pkw Ladepunkt privat (22 kW)	Anzahl	10.000.000	2.200.000	1.000.000
Pkw Ladepunkt öffentlich (150 kW)	Anzahl	1.000.000	220.000	100.000
BEV				
Lkw Ladepunkt privat (150 kW)	Anzahl	56.000	100.000	102.000

⁵ Knapp 100.000 öffentliche Ladesäulen laut Ladesäulenregister der Bundesnetzagentur, Stand Juni 2023 <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/Ladesaeulenkarte/start.html>

Zubau Lade-Infrastruktur	Einheit	2021-2030	2031-2035	2036-2040
Lkw Ladepunkt öffentlich (150 kW)	Anzahl	20.000	18.000	10.000
Lkw Ladepunkt öffentlich (1000 kW)	Anzahl	1.100	900	500
Umspannwerke Lade-Hubs	Anzahl	120	100	100
BEV + FCEV				
Lkw Ladepunkt privat (150 kW)	Anzahl	42.000	75.000	76.500
Lkw Ladepunkt öffentlich (150 kW)	Anzahl	15.000	13.500	7.500
Lkw Ladepunkt öffentlich (1000 kW)	Anzahl	825	675	375
Umspannwerke Lade-Hubs	Anzahl	120	100	100
Wasserstoff-Tankstellen (jeweils 10 Zapfhähne)	Anzahl	160	50	50
BEV + O-BEV				
Lkw Ladepunkt privat (150 kW)	Anzahl	42.000	75.000	76.500
Lkw Ladepunkt öffentlich (150 kW)	Anzahl	15.000	13.500	7.500
Lkw Ladepunkt öffentlich (1000 kW)	Anzahl	825	675	375
Umspannwerke Lade-Hubs und Unterwerke Oberleitungen	Anzahl	1.260	860	100
Oberleitungsanlagen (beide Richtungen)	km	4.500	3.800	

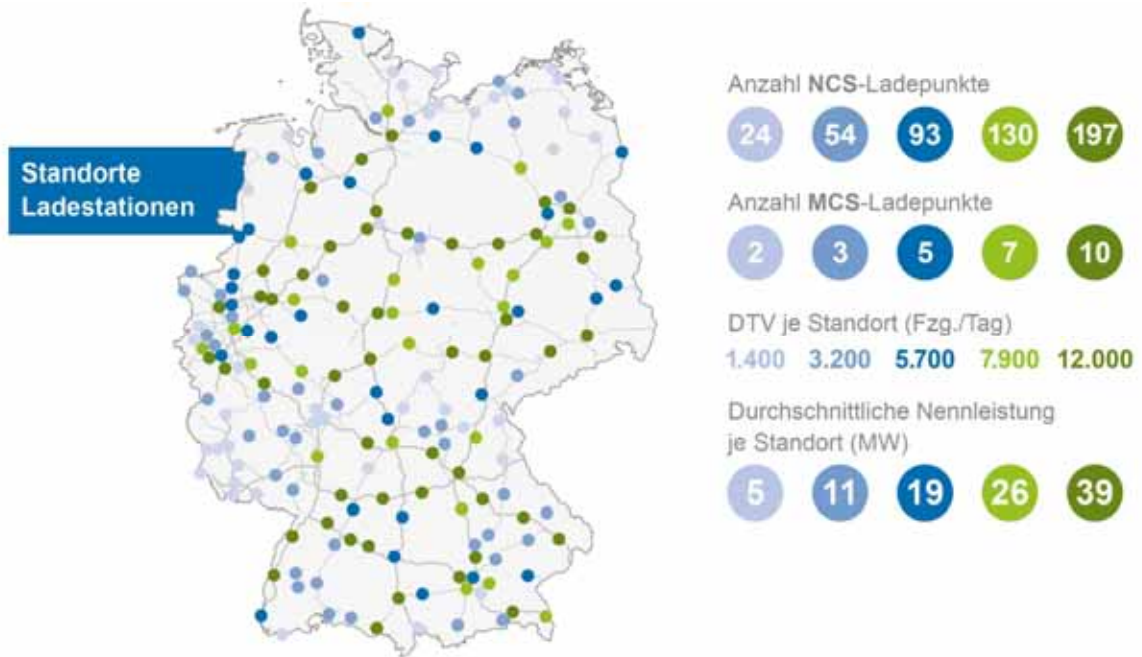
Quelle: Eigene Annahmen, für Pkw basierend auf [BMDV 2022] und [NOW 2020], für Lkw basierend auf [Göckeler et al. 2023]

Für Lkw werden private Ladepunkte im Depot, öffentliche Ladepunkte mit einer Nennleistung von 150 kW für Ladevorgänge über Nacht entlang der Strecke und öffentliche Ladepunkte im Megawatt-Bereich unterschieden. Letztere sollen ein Nachladen des Batteriespeichers innerhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Lenk- und Ruhepause nach 4,5-stündiger Fahrt ermöglichen, befinden sich allerdings noch vor der Markteinführung. Die Bedarfsabschätzung basiert auf den Analysen im StratES-Projekt, in welchen der modellierte Endenergiebedarf für öffentliches Laden anhand von regionalen Verkehrsstärken auf Ladestandorte entlang des Bundesautobahnnetzes verteilt wurde.

Eine Übersicht der Lade-Hubs und der je Standort benötigten Megawatt Charging Systems (MCS) und Night Charging Systems (NCS) ist in Abbildung 2-1 veranschaulicht. Die Anzahl an Umspannwerken bezieht sich auf die dargestellte Anzahl an öffentlichen Lade-Hubs und im Fall von Oberleitungssystemen auf die Unterwerke, die im Abstand von etwa 2 Kilometern zur Stromversorgung der Oberleitung errichtet werden. Die Hauptlast des Zubaus wird im Zeitraum von 2025 bis 2035 angenommen.

Im Vergleich der Technologie-Mix Szenarien für Lkw sparen zusätzliche Brennstoffzellenfahrzeuge oder Oberleitungs-Lkw rund ein Viertel der stationären Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw ein. Der Aufbau von Wasserstoff-Tankstellen und Oberleitungssystemen ist im Gegenzug ebenfalls mit erheblichen Aufwänden verbunden. Für Oberleitungssysteme geht die Studie von einem Aufbau von 8.300 Kilometer Oberleitungen in beide Fahrtrichtungen aus, die zwischen 2025 bis 2035 errichtet werden (Abbildung 2-2). Für Wasserstoff-Tankstellen sind in Summe bis zum Jahr 2040 rund 220 Standorte vorgesehen mit 10 Wasserstoff-Zapfhähnen je Tankstelle.

Abbildung 2-1: Bedarfsabschätzung von Lade-Hubs an Autobahnen im Jahr 2035 auf Basis der lokalen Verkehrsstärke in 5 Größenkategorien („BEV“-Szenario)



NCS: Night Charging Systems, MCS: Megawatt Charging Systems, DTV: Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke

Quelle: [Göckeler et al. 2023]

Abbildung 2-2: Bedarfsabschätzung von Oberleitungssystemen an Autobahnen im Jahr 2035 auf Basis der lokalen Verkehrsstärke in 5 Größenkategorien („BEV + O-BEV“-Szenario)



Quelle: [Hacker et al. 2020]

Materialintensität der einzelnen Infrastrukturkomponenten

Als wesentlicher Rohstoff für die stromleitenden Komponenten der Energieversorgungsinfrastruktur (Ladepunkte, Umspannwerke und Oberleitungen) wurde das Kupfer für die Leitungen und Elektronik identifiziert. Demgegenüber werden in der Wasserstoff-Infrastruktur nicht in großem Umfang kritische Metalle eingesetzt, da die Speichertanks, Rohrleitungen und Kompressoren aus Stahl gefertigt werden. Zwar sind für die Wasserstoffspeicherung, insbesondere unter Druck, spezielle Legierungen oder Kompositmaterialien nötig⁶. Die Recherche ergab jedoch keine belastbaren Hinweise auf einen Einsatz spezieller Zuschlagsmetalle in signifikanten Mengen, die eine weitere Befassung im Rahmen dieser Studie rechtfertigen würde. Eine aktuelle Studie ergab zudem, dass insbesondere für Gasleitungen alle typischerweise in Deutschland verwendeten Stahlwerkstoffe, H₂-tauglich sind [DVGW 2023].

Zur Quantifizierung der Kupferbedarfe wurden folgende Quellen und Berechnungen zugrunde gelegt:

Ladepunkte

Zur Modellierung des Kupferbedarfes von Ladepunkten wird auf die in [Helms et al. 2022] dargestellte Zusammensetzung nach Bekel & Pauliuk (2019) zurückgegriffen, die Anteile von Elektronik und Kabeln von 17,5 % bzw. 5 % bei einer Gesamtmasse von 320 kg pro 100 kW Ladepunkt zeigt. Der Kupferbedarf wurde unter der eigenen Annahme von ca. 20 % Kupfer in Elektronik und 80 % Kupfer in Kabeln zu insgesamt 24 kg Kupfer je 100 kW-Ladepunkt abgeschätzt. Vereinfachend wurde dieser Bedarf linear auf die Leistungsklassen in Tabelle 2-4 umgerechnet. In der 1 MW-Klasse ergibt die lineare Skalierung über die Leistung im Vergleich zur Skalierung über die Masse in [Helms et al. 2022] möglicherweise eine Überschätzung, die aber aufgrund der vergleichsweise geringen Stückzahlen der MW-Ladepunkte (vgl. Tabelle 2-4) nicht ins Gewicht fällt.

Oberleitung

Die Querschnittsfläche der Fahrdrähte und des Tragseils wurde [Kühnel et al. 2018] entnommen. Daraus wurde der Kupferbedarf aus der Zusammensetzung von magnesiumlegiertem Kupferdraht abgeleitet. Je Kilometer ergibt sich daraus der folgende Kupfereinsatz:

- Fahrdraht 1,34 t/km
- Tragseil 1,10 t/km.

Für Oberleitungssysteme müssen zwei Fahrdrähte gespannt werden, von denen ein Fahrdraht als Plus- und der andere als Minuspol dient (im Gegensatz zu Schienenfahrzeugen, wo die Erdung über die Metallkontakt zwischen Fahrzeug und Schiene erfolgt und nur ein Fahrdraht benötigt wird). Hinzu kommen zwei Tragseile, an denen der Fahrdraht jeweils aufgehängt ist. Die zugebaute Länge (beide Richtungen) für jede Komponente ist Tabelle 2-4 zu entnehmen.

Umspannwerke

Der Kupfergehalt von Umspannwerken wurde in der Größenordnung aus den Angaben in [Sphera/ Fraunhofer IBP 2021] abgeschätzt. Im Mittel ergibt sich aus der angegebenen Gesamtmasse eines Umspannwerkes von ca. 2-4 t und dem Kupfergehalt von 14-16 % eine Kupfermenge von 0,45 t pro Umspannwerk. Dieser Wert wurde sowohl für die Umspannwerke für die Ladehubs als auch für die

⁶ Vgl. hierzu [Sobol 2022], [Urban 2023].

Unterwerke im Oberleitungssystem angesetzt und mit dem in Tabelle 2-4 dargestellten Zubau hochgerechnet.

2.4.2 Stromerzeugung auf Basis Erneuerbarer Energien

Methodische Herangehensweise zur Ableitung des benötigten EE-Zubaus

Um einen substanziellen Klimavorteil und mittel- bis langfristig das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen, muss der zum Antrieb der Fahrzeuge eingesetzte Strom aus erneuerbaren Energiequellen stammen. Der Aufbau von Erzeugungskapazitäten für Erneuerbare Energien findet jedoch nicht sektorspezifisch, sondern als gesamtheitliche Aufgabe der Energiewende statt. Dennoch sollen im Folgenden die Bedarfe abgeschätzt werden, die sich aus der Elektrifizierung des Straßenverkehrs ergeben. Ziel ist es dabei, die Rohstoffbedarfe für die Transformation vollständig vom Fahrzeug (s. Kapitel 2.3 und 3.2-3.4), über die Energieversorgungsinfrastrukturen (s. Kapitel 2.4.1 und 3.5.3), bis zur Stromproduktion aufzuzeigen.

Hierfür wird der aus dem Straßenverkehr nachgefragte Strom auf die benötigte Leistung an Anlagen umgerechnet. Dies geschieht über die in Deutschland im Mittel erzielbaren Volllaststunden der Erneuerbaren Energien. Die Verwendung der anlagenseitig möglichen Volllaststunden unterstellt vereinfachend, dass der gesamte von den EE-Anlagen erzeugte Strom auch genutzt werden kann. Diese vollständige Netzintegration der produzierten Strommengen ist nur im flexiblen Zusammenspiel aller Verbraucher erzielbar und vernachlässigt, dass Erzeugungsspitzen bei unzureichender Flexibilität möglicherweise nicht genutzt werden können. Der Ansatz zeigt jedoch eine Größenordnung des nötigen Zubaus auf. Entscheidend für die Allokation des Zubaus von EE-Anlagen zum Verkehrssektor ist also die Frage, welche Energiemenge pro Jahr zur Deckung der Stromnachfrage im Verkehrssektor durch den Anlagenpark erzeugt werden muss.

Konkret wurde folgende Herangehensweise gewählt:

- a. Anhand der Modellierung des Hochlaufs der Elektromobilität (Darstellung der Szenarien s. Kap. 2.1 und resultierender Markthochlauf s. Kap. 3.1) wurde der jährliche Mehrbedarf an Strom bestimmt (Darstellung des Endenergiebedarfs in Kapitel 3.5.1).
- b. Der Wasserstoffbedarf für Brennstoffzellen-Lkw wurde unter Annahme eines Elektrolyse-Wirkungsgrades von 60 % im Jahr 2020 und 70 % im Jahr 2040 (dazwischen linear) bezogen auf den Heizwert in Strombedarf umgerechnet.
- c. Aus eigenen aktuellen Arbeiten [Harthan et al. 2023] wurde eine Verteilung der erneuerbaren Stromerzeugung auf die wesentlichen Anlagen (PV, Wind onshore und Wind offshore)⁷ abgeleitet (Tabelle 2-5).
- d. Über die in Tabelle 2-5 aufgeführten mittleren Volllaststunden, die mit den jeweiligen Technologien in Deutschland erzielbar sind [Harthan et al. 2023], wurde die steigende Nachfrage aus dem Verkehrssektor in den entsprechenden Leistungszubau umgerechnet.

⁷ Die Stromerzeugung aus Biomasse und Laufwasser wurde aufgrund der geringen Anteile, insbesondere in späten Jahren, vereinfachend vernachlässigt. 2020-2030 liegt ihr Anteil im Mittel noch bei 17 %, geht im Jahr 2030 jedoch auf 10 % zurück und sinkt bis 2040 kontinuierlich bis auf 3 % Anteil.

Tabelle 2-5: Annahmen zur Abschätzung der Zubaubedarfe an Erneuerbaren Energien in Deutschland

Erneuerbare Energien Anlagen	Einheit	Photovoltaik	Wind onshore	Wind offshore
Anteil an EE-Stromerzeugung	%	42 %	36 %	22 %
Volllaststunden	h/a	951	1.970	3.358

Quelle: Eigene Annahmen basierend auf Harthan et al. 2023

Materialintensität einzelner EE-Anlagen

Der Rohstoffbedarf der einzelnen Technologien für Photovoltaik- und Windkraftanlagen wurde [JRC 2020] entnommen und um Informationen aus [IEA 2021] und [SKN 2023] ergänzt.

Photovoltaik

Tabelle 2-6 zeigt die Anteile unterschiedlicher Technologien für die PV-Zellen. Mit weitem Abstand dominieren auch im Jahr 2040 noch Wafer-Zellen aus kristallinem Silizium.

Tabelle 2-6: Anteile unterschiedlicher PV-Technologien

PV-Zellen-Technologie	Einheit	heute	2040	Kommentar
Kristallines Silizium (Wafer)	-	94 %	88 %	dazwischen linear
Cadmium-Tellur (Dünnschicht)	-	4 %	6 %	restlicher Anteil
Kupfer-Indium-Gallium-Selenid (Dünnschicht)	-	2 %	1 %	dazwischen linear
Amorphes Silizium	vereinfachend vernachlässigt		sehr geringe Anteile	
Gallium-Arsenid (Dünnschicht)	-	0 %	5 %	Markteintritt erst ab 2035, dann linear

Quelle: Eigene Annahmen basierend auf [IEA 2021] und SKN [2023]

Als wichtige Rohstoffe wurden insbesondere Kupfer, Silizium, Silber, Tellur und Gallium betrachtet. Die angesetzten Materialinhalte basierend auf [JRC 2020] und [SKN 2023] sind in Tabelle 7-1 im Anhang dargestellt.

Windkraft

Tabelle 2-7: und Tabelle 2-8: zeigen die Anteile unterschiedlicher Technologien für Windkraftanlagen für heute und 2035 nach [Betz et al. 2021a] in Anlehnung an [JRC 2020]. Da der Zeitrahmen dieser Studie bis 2040 geht und die Betrachtung des Rohstoffbedarfs für die EE-Stromerzeugung orientierend erfolgt, wurde die für 2035 angegebene Verteilung jeweils konstant bis 2040 fortgeschrieben. Zwischen heute und 2035 wurde vereinfachend linear interpoliert. Bei den Onshore-Anlagen werden vier wesentliche Technologien eingesetzt, wobei heute noch Asynchron-Generatoren dominieren. Bis 2030 geht ihr Anteil insbesondere zugunsten getriebeloser permanenterregter Synchron-Generatoren zurück.

Tabelle 2-7: Anteile unterschiedlicher Wind-onshore-Technologien

Windkraftanlagen-Typ	Einheit	heute	2035
Asynchrongeneratoren (mit Getriebe)	-	40 %	20 %
Permanenterregte Synchrongeneratoren (mit Getriebe)	-	25 %	32 %
Permanenterregte Synchrongeneratoren (getriebeles)	-	5 %	24 %
Fremderregte Synchrongeneratoren (getriebeles)		30 %	24 %

Quelle: [Betz et al. 2021a] in Anlehnung an [JRC 2020]

Bei Offshore-Anlagen kommen aufgrund erhöhter Anforderungen an Konstruktion und Wartung permanenterregte Synchrongeneratoren zum Einsatz.

Tabelle 2-8: Anteile unterschiedlicher Wind-offshore-Technologien

Windkraftanlagen-Typ	Einheit	heute	2035
Permanenterregte Synchrongeneratoren (mit Getriebe)	-	28 %	14 %
Permanenterregte Synchrongeneratoren (getriebeles)	-	72 %	86 %

Quelle: [Betz et al. 2021a] in Anlehnung an [JRC 2020]

Als wichtige Rohstoffe wurden Kupfer, sowie v. a. die in Permanentmagneten eingesetzten Seltenen Erden identifiziert. Die angesetzten Materialinhalte, konstant für alle Jahre, basierend auf [JRC 2020] sind in Tabelle 7-2 im Anhang dargestellt. Demnach sind insbesondere die getriebeles, permanenterregten Synchrongeneratoren mit einem hohen Einsatz an Seltenen Erden verbunden, wohingegen für Asynchrongeneratoren nur in sehr geringer Menge seltenerdhaltige Permanentmagnete gebraucht werden.

PEM-Elektrolyseure

Im Szenario BEV+FCEV wird außerdem Wasserstoff eingesetzt, der mittels Wasserelektrolyse aus PV- oder Windstrom erzeugt wird. Vereinfachend wurde hier angenommen, dass dafür die aktuell im Markt befindlichen alkalischen und PEM-Elektrolyseure eingesetzt werden (neue Technologien, die bis 2040 mit kleinen Anteilen in den Markt kommen, s. z. B. [SKN 2023], wurden vernachlässigt). Nach [Kiemel et al. 2021], [SKN 2023] kommen in alkalischen Elektrolyseuren keine kritischen Rohstoffe zum Einsatz, in PEM-Elektrolyseuren sind v. a. die Platingruppenmetalle zu betrachten. Zur Abschätzung des Platin- und Iridiumbedarfs wurden die in Tabelle 2-9 dargestellten Anteile für PEM-Elektrolyse und PGM-Beladungen zugrunde gelegt. Die Entwicklung zwischen heute und 2040 wurde jeweils vereinfachend linear angesetzt.

Tabelle 2-9: Annahmen zur Abschätzung des Platin- und Iridiumbedarfs für Elektrolyseure

Parameter	Einheit	heute	2040
Anteil PEM-Elektrolyseure	%	30 %	40 %
Platinbeladung	g/kW _{el}	0,33	0,04
Iridiumbeladung	g/kW _{el}	0,67	0,05

Quelle: PEM-Anteil 2040 eigene Annahme in Anlehnung an [SKN 2023], PGM-Beladung heute [Kiemel et al. 2021], 2040 [SKN 2023]

Im Basisszenario wird berechnet, welcher Zubau an EE-Anlagen für die Wasserstofferzeugung mit den in Deutschland erwartbaren Volllaststunden (VLS) für PV und Windkraft nötig wäre (s. Tabelle 2-5). In einer groben Abschätzung wird aufgezeigt, wie sich höhere Volllaststunden, die an geographisch besser geeigneten Standorten erzielt werden können, auf den nötigen Zubau an EE-Anlagen⁸ und PEM-Elektrolyseuren auswirken. Die Verteilung der Stromerzeugung auf die einzelnen EE-Anlagen wird dabei wie im Basisszenario angesetzt, um nicht mehrere Parameter gleichzeitig zu variieren. Die zugrunde gelegten Annahmen zeigt Tabelle 2-10: Für den Fall, dass der Zubau der Elektrolyseure und die Wasserstofferzeugung im Ausland stattfindet, werden zudem Verluste beim Wasserstofftransport (Boil-off) berücksichtigt.

Tabelle 2-10: Volllaststunden für Elektrolyseure sowie EE-Anlagen global günstiger Standorte und Transportverluste bei Wasserstoff-Import

Parameter	Standort	Einheit	heute
Volllaststunden PEM-Elektrolyseure	DE	h/a	3.000
Volllaststunden PEM-Elektrolyseure	Ausland	h/a	4.500
Volllaststunden Windkraft (on- & offshore)	Ausland	h/a	3.500
Volllaststunden Photovoltaik	Ausland	h/a	1.500
Transportverluste Wasserstoff-Import		-	5 %

Quelle: VLS PEM-Elektrolyse [SKN 2023], VLS EE-Anlagen Ausland und Transportverluste Wasserstoff-Import eigene Annahmen basierend auf [Fraunhofer IEE 2022]

⁸ Nur die Volllaststunden der Offshore-Windkraft in Deutschland kommen bereits sehr nahe an die für globale Wind-Best-Standorte unterstellten heran.

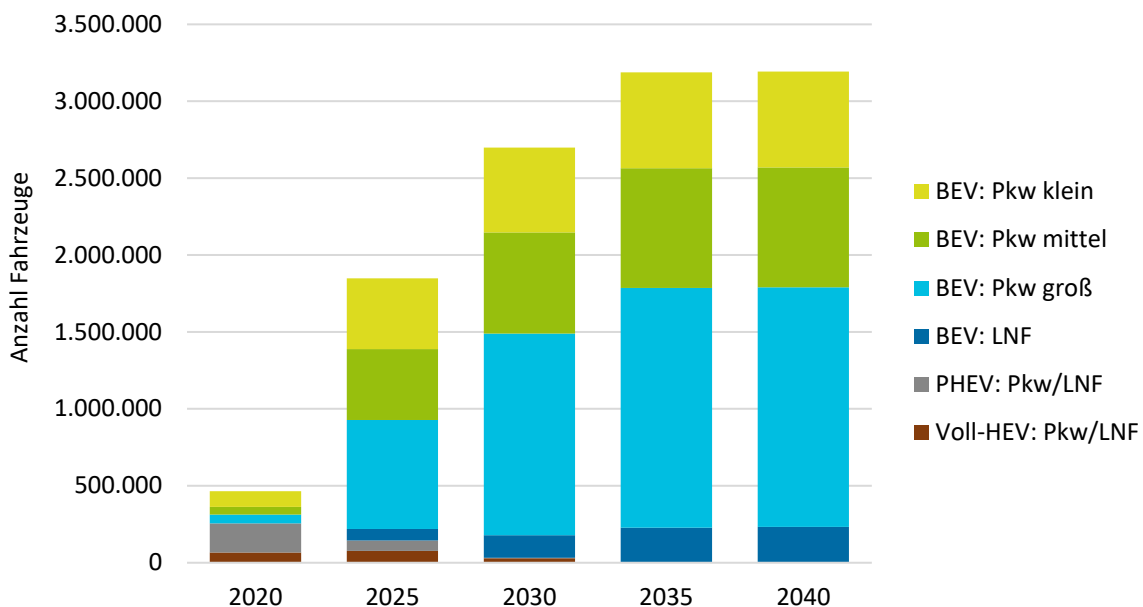
3 Die Hochlaufszzenarien 2030/2040

3.1 Markthochlauf für E-Pkw und E-Lkw

Der Markthochlauf von Pkw mit Elektroantrieb in Abbildung 3-1 zeigt einen steilen Anstieg der Neuzulassungen bis zum Jahr 2030. Bereits bis 2025 müssen sich die Neuzulassungen von BEV gegenüber dem Jahr 2020 fast verzehnfachen, um das Ziel von 15 Millionen vollelektrischen Pkw im Bestand bis zum Jahr 2030 zu erreichen. Nach 2030 wird der Zuwachs moderater bis die Neuzulassungen von BEV ab 2035 in dem Szenario konstant bei 3,2 Mio. Fahrzeugen pro Jahr bleiben.

Der Anteil von Plug-in Hybriden und Voll-Hybriden sinkt zugunsten von BEV nach 2025 gegen Null. Zur besseren Übersichtlichkeit sind PHEV und Voll-HEV aggregiert über die Größenklassen dargestellt. Im Vergleich der Größenklassen machen „Pkw groß“ – also u. a. (obere) Mittelklassemodelle und SUVs – den größten Anteil an den Neuzulassungen aus. Einschließlich leichter Nutzfahrzeuge hat die Größenklasse „Pkw groß“ einen Anteil von knapp 50 % an den Neuzulassungen.

Abbildung 3-1: Neuzulassungen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen (LNF) mit E-Antrieb



BEV: Batterieelektrisches Fahrzeug, PHEV: Plug-in-Hybrid-Fahrzeug, Voll-HEV: Vollhybrid Fahrzeug

Quelle: Eigene Berechnungen

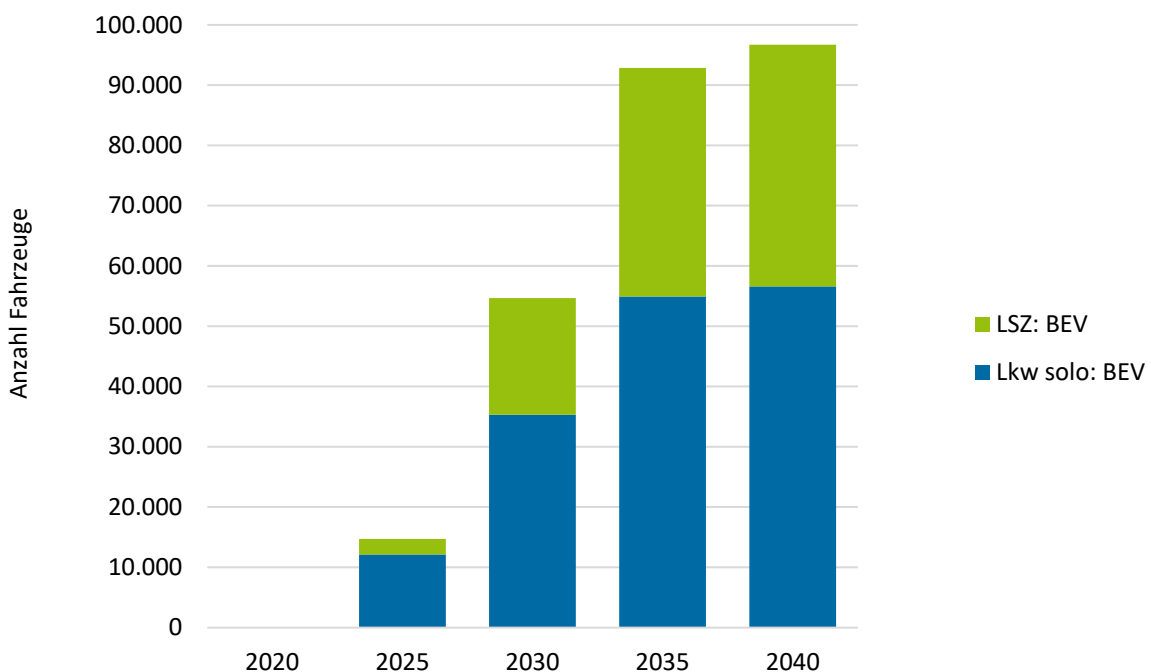
Für schwere Nutzfahrzeuge ist der Markthochlauf elektrischer Antriebe gegenüber Pkw zeitlich verzögert. Er zeigt in Abbildung 3-2 allerdings ebenfalls einen steilen Anstieg der BEV-Neuzulassungen von 2025 bis 2035. Hier ist zunächst das reine BEV-Szenario dargestellt. Ab 2035 werden auch für schwere Nutzfahrzeuge in der Modellierung fast ausschließlich BEV neuzugelassen. Das ökonomische Potenzial ist nicht zuletzt durch die CO₂-basierte Maut bereits in dieser Dekade gegeben. Steht eine ausreichende öffentliche Ladeinfrastruktur zur Verfügung, um für lange Transportdistanzen ein Nachladen der Batterie innerhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Lenk- und Ruhepause nach 4,5-stündiger Fahrt zu ermöglichen, sind auch technische Einschränkungen aufgrund der gegenüber Diesel-Lkw geringeren Reichweiten von BEV weitestgehend behoben. Dafür steht in der

Modellierung ab 2035 ein flächendeckendes Netz von öffentlichen Ladepunkten mit Ladeleistungen bis zu einem Megawatt bereit.

Der weitere Anstieg in den Neuzulassungen nach 2035 resultiert aus der kontinuierlich steigenden Güterverkehrsleistung, die insbesondere im Straßenverkehr aufschlägt. Der Modellierung liegt die Verkehrsprognose aus dem Referenzszenario der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) REF-2017 zu Grunde [Schade et al. 2018], die ebenfalls dem Projektionsbericht der Bundesregierung 2021 als Basis diente [Repenning et al. 2022]. Darin wächst die Transportleistung im Straßengüterverkehr von knapp 500 Mrd. Tonnenkilometer im Jahr 2019 auf 625 Mrd. Tonnenkilometer im Jahr 2040 an. In Folge werden in der Modellierung jährlich mehr Nutzfahrzeuge neu zugelassen.

Im Vergleich zu Pkw sind die Stückzahlen der Neuzulassungen schwerer Nutzfahrzeuge sehr viel geringer und belaufen sich im Jahr 2040 auf knapp 97.000 Fahrzeuge. Die drei Größenklassen von Lkw unterschiedlicher Gesamtgewichte sind hier als „solo Lkw“ zusammengefasst, damit sind Lkw ohne Anhänger gemeint. Die schwerste Größenklasse der Last- und Sattelzüge (also Lkw plus Anhänger oder Sattelzugmaschine plus Sattelaufleger) macht rund 40 % der neuen schweren Nutzfahrzeuge aus.

Abbildung 3-2: Neuzulassungen von solo Lkw (ohne Anhänger) und Last- und Sattelzügen (LSZ) mit E-Antrieb im Szenario „BEV“



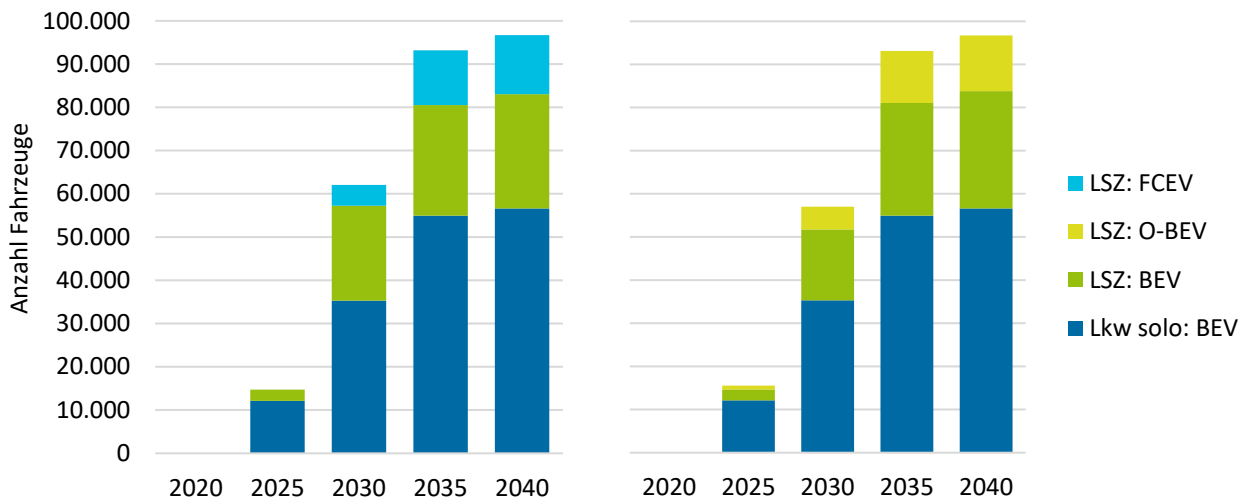
BEV: Batterieelektrisches Fahrzeug, LSZ: Last- und Sattelzüge

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Göckeler et al. 2023

Die beiden weiteren untersuchten Technologiepfade für Lkw sind in Abbildung 3-3 dargestellt. Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) kommen in den Markt, wenn in der Modellierung eine Kombination aus günstigen Wasserstoffpreisen an den Tankstellen (5,70 €/kg in 2030) mit teuren Ladestrompreisen an öffentlichen Ladepunkten (z. B. 42 ct/kWh an Megawatt-Ladepunkten in 2030) gewählt wird. In diesem Fall erreichen FCEV in den Neuzulassungen von Last- und Sattelzügen einen Anteil von rund einem Drittel. Oberleitungs-Lkw (O-BEV) erreichen ebenfalls einen Marktanteil

an den Neuzulassungen von Last- und Sattelzügen, wenn in Deutschland rund 4.000 Autobahnkilometer (etwa ein Drittel des Gesamtnetzes) über Oberleitungssysteme elektrifiziert werden. In beiden Technologiepfaden und auch in allen anderen im Projekt StratES berechneten Szenarien haben BEV perspektivisch den größten Anteil an den Neuzulassungen von Last- und Sattelzügen [Göckeler et al. 2023].

Abbildung 3-3: Neuzulassungen von solo Lkw (ohne Anhänger) und Last- und Sattelzügen (LSZ) mit E-Antrieb in den Szenarien „BEV+FCEV“ und „BEV+O-BEV“



BEV: Batterieelektrisches Fahrzeug, FCEV: Fahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb, O-BEV: Oberleitungsfähiges batterieelektrisches Fahrzeug

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Göckeler et al. 2023

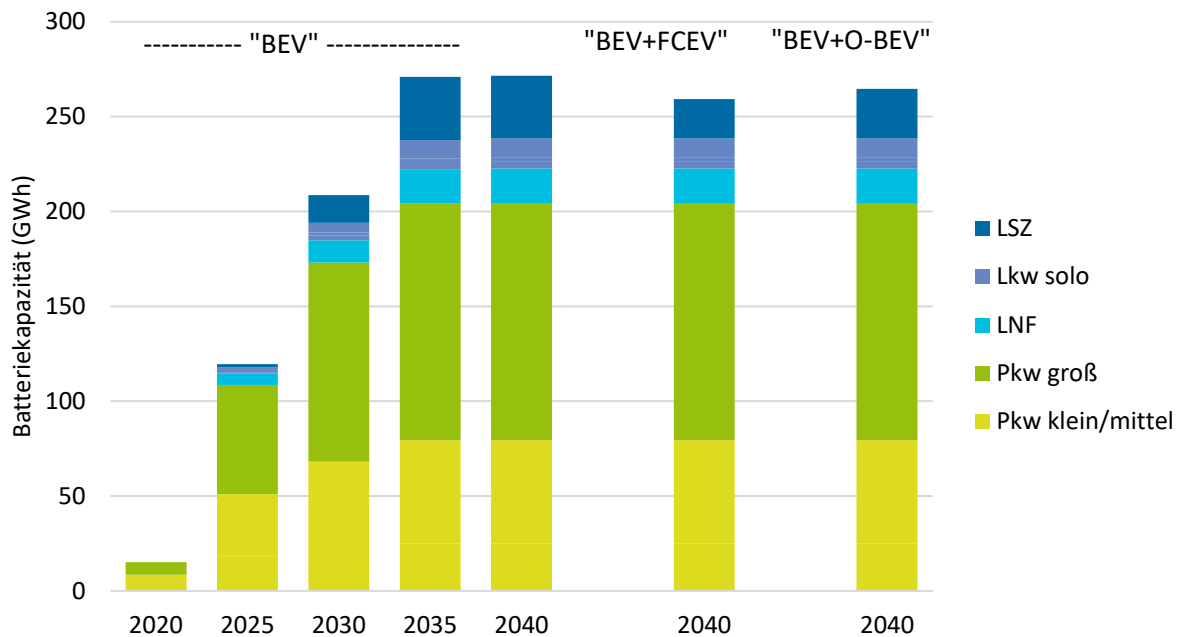
Insgesamt folgt aus den Markthochlauf-Szenarien, dass nicht nur für Pkw, sondern aller Voraussicht nach auch für Lkw ein Antriebswechsel auf überwiegend batterieelektrische Antriebe zu erwarten ist. Die Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen zeigen dabei einen steilen jährlichen Anstieg, der für Pkw insbesondere im Zeitraum bis 2030 und für Lkw etwas verzögert von 2025 bis 2035 aufschlägt.

3.2 Rohstoffnachfrage für Antriebsbatterien

Bevor die Rohstoffnachfrage detailliert aufgeschlüsselt wird, zeigt Abbildung 3-4 zunächst die Gesamtnachfrage nach Antriebsbatterien, die sich aus der Markthochlauf-Modellierung ergibt. Im reinen „BEV“-Szenario wächst der jährliche Bedarf an Batteriekapazität von 2020 bis 2030 rasant von 15 GWh auf 210 GWh an und steigt in den Folgejahren bis 2035 weiter auf 270 GWh. Haupttreiber für die Entwicklung sind die Neuzulassungen batterieelektrischer Pkw. Zwar haben Lkw deutlich größere Batteriesysteme verbaut, die hohen Stückzahlen der Pkw-Neuzulassungen sind allerdings ausschlaggebend für die Gesamtnachfrage an Batteriesystemen.

Im Vergleich der Größenklassen bestimmen vor allem „Pkw groß“ mit einem Anteil von 50 % im Jahr 2030 die Gesamtnachfrage der Batteriekapazität. Die schwerste Größenklasse, die Last- und Sattelzüge, kommen ab dem Jahr 2035 auf einen Anteil von 12 %. Entsprechend klein ist auch der Unterschied zu den Technologiepfaden mit Antriebsmix. Sowohl FCEV und O-BEV werden mit weniger Batteriekapazität bestückt, allerdings sind die Stückzahlen und damit verbunden Einsparpotenziale bei einer gemeinsamen Betrachtung mit Pkw relativ gering.

Abbildung 3-4: Bedarf an Batteriekapazität für E-Fahrzeuge



LSZ: Last- und Sattelzüge, Lkw solo: Lkw ohne Anhänger, LNF: Leichte Nutzfahrzeuge

Quelle: Eigene Berechnungen

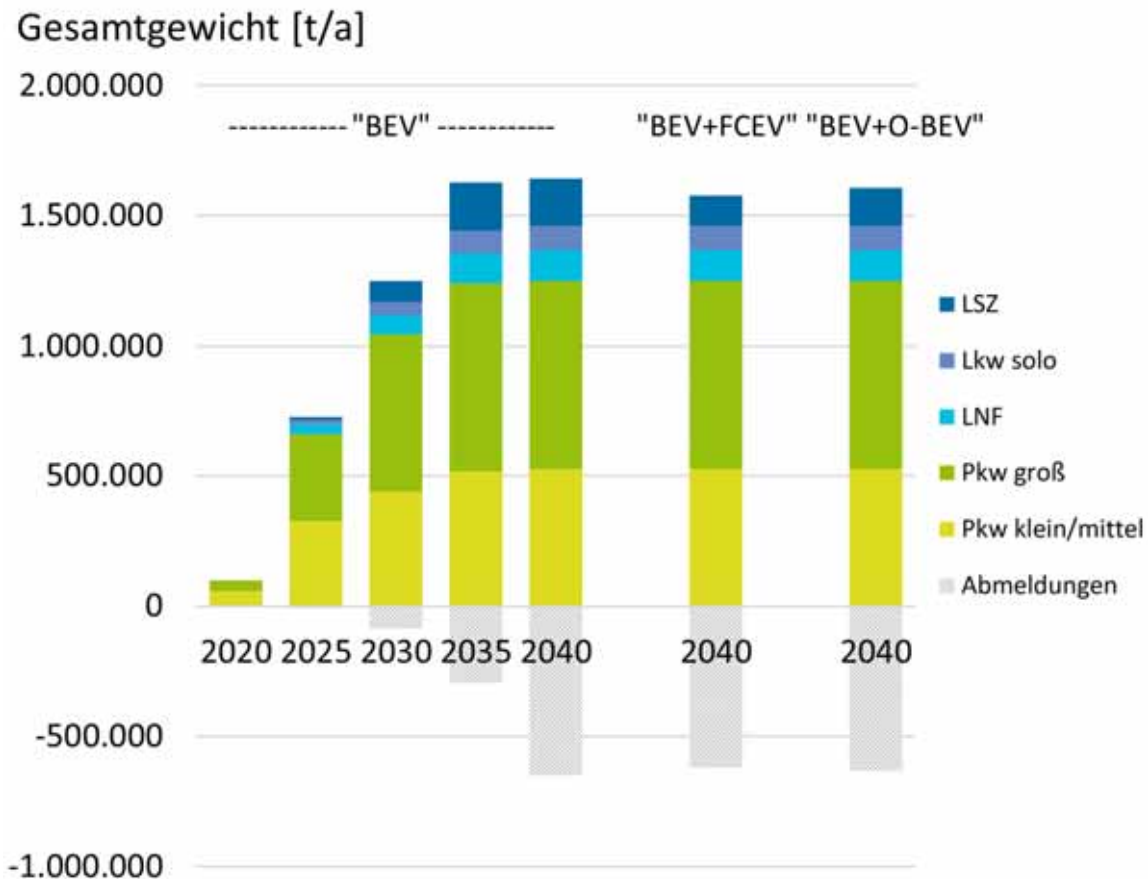
Auch wenn es keinen direkten proportionalen Zusammenhang zwischen dem Gewicht einer Batterie und der Kapazität gibt, wird das Batteriegewicht basierend auf der spezifischen Energiedichte des Kathodenmaterials primär durch die Kapazität beeinflusst. Batterien mit höherer Kapazität sind in der Regel schwerer als Batterien mit geringerer Kapazität. Andere Faktoren, welche das Batteriegewicht beeinflussen sind das Design und die Bauweise des Batteriesystems, Art der verwendeten Materialien, Aufbau des Gehäuses und der Verpackung, verbaute Sicherheitssysteme und Skaleneffekte.

Parallel zum Bedarf an Batteriekapazitäten wird folglich auch das Gesamtgewicht der verbauten Batterien in allen neu zugelassenen Fahrzeugen vom Pkw-Sektor dominiert, wie in Abbildung 3-5 dargestellt. Obwohl die in Lkw verbauten Batteriesysteme deutlich größer und damit schwerer sind, macht insbesondere die Fahrzeugklasse „Pkw groß“, basierend auf den großen Stückzahlen, fast die Hälfte des Gewichts aller Batterien aus. FCEV und O-BEV werden mit leichteren Batterien mit vergleichsweise geringerer Kapazität bestückt. Darauf basierend ist das Gesamtgewicht der Batterien in den Technologiepfaden mit Antriebsmix niedriger. Da die in Last- und Sattelzügen verbauten Batterien ab 2035 nur ca. 11 % des Gesamtgewichts ausmachen, sind die Gesamtunterschiede zwischen den Szenarien, vergleichsweise moderat. Die insgesamt jährlich nachgefragten Batteriemengen summieren sich im „BEV“-Szenario bereits im Jahr 2030 auf etwa 1.631.000 Tonnen und erreichen im Jahr 2040 eine jährliche Nachfrage von 1.643.000 Tonnen. Im „BEV+FCEV“-Szenario sowie im „BEV+O-BEV“-Szenario ist die jährliche Nachfrage im Jahr 2040 mit 1.575.000 Tonnen bzw. 1.605.000 Tonnen nur wenig geringer im Vergleich zum „BEV“-Szenario.

In Abbildung 3-5 wird auch das Gesamtgewicht der Batterien in abgemeldeten Fahrzeugen dargestellt. Auf Grund des Zeitraums zwischen Neuzulassung und Abmeldung steigt dieses erst mit einer Verzögerung an. Ab 2030 ist mit ersten signifikanten Mengen Batterien aus abgemeldeten Fahrzeugen zu rechnen. Das Potenzial kommt dabei auf ein Gesamtgewicht von ca. 100.000 Tonnen. Mittelfristig ist ein kontinuierlicher Anstieg der Abmeldungen von E-Fahrzeugen zu erwarten, so dass

das Potenzial für recyclebare Batterien auf ein Gesamtgewicht von rund 650.000 Tonnen im Jahr 2040 anwächst und im Jahr 2045 ca. 1.010.000 Tonnen pro Jahr erreicht. Aufgrund der geringeren Batteriegewichte in FCEV und O-BEV ist in den Szenarien mit Antriebsmix auch das Gesamtgewicht der Batterien aus Abmeldungen geringer, allerdings ist die Differenz vergleichsweise geringer durch die Verzögerung der Abmeldungen, die der Hochlaufwelle für Elektrofahrzeuge nachfolgen.

Abbildung 3-5: Gesamtgewicht des Bedarfs an Batterien für E-Fahrzeuge



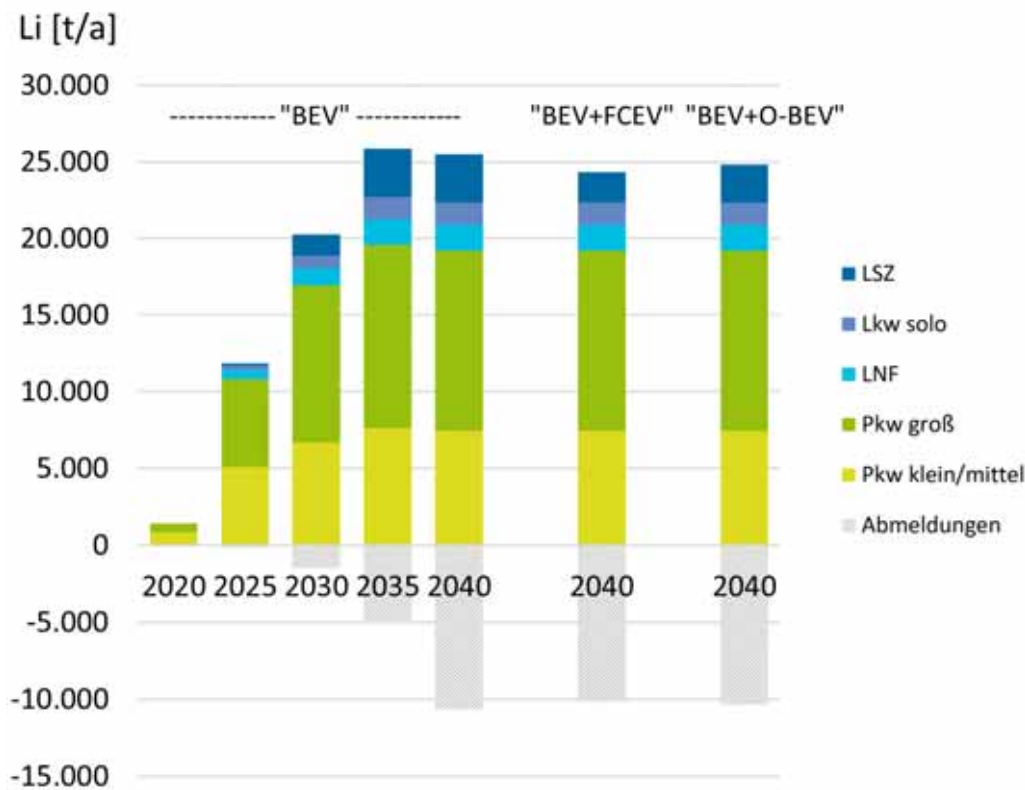
LSZ: Last- und Sattelzüge, Lkw solo: Lkw ohne Anhänger, LNF: Leichte Nutzfahrzeuge

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 3-6 zeigt den Lithiumbedarf für Batterien in neu zugelassenen Fahrzeugen bis 2040. Zunächst steigt der Bedarf bis zum Jahr 2035 deutlich auf gut 25.000 Tonnen im Jahr an. Ab 2035 bleibt die Nachfrage auf einem stabilen Niveau oder zeigt eine leichte Abnahme. Dies resultiert aus einem höheren Marktanteil von LFP-basierten Batteriesystemen, welche pro kWh geringfügig weniger Lithium benötigen. Basierend auf den kleineren in FCEV und O-BEV Fahrzeugen verbauten Batterien geht der Bedarf nach Lithium in den Szenarien mit Antriebsmix leicht zurück. 2040 sind dies im „BEV+FCEV“-Szenario etwa 1.200 Tonnen pro Jahr und etwa 700 Tonnen pro Jahr im „BEV+O-BEV“-Szenario im Vergleich zum „BEV“ Szenario.

Die Menge an Lithium in Batterien in abgemeldeten Fahrzeugen steigt bis 2040 kontinuierlich an und liegt dann bei über 10.000 Tonnen pro Jahr. Darüber hinaus steigt bis zum Jahr 2045 die in abgemeldeten Fahrzeugen befindliche Menge an Lithium auf ca. 16.400 Tonnen pro Jahr an, während die Nachfrage auf einem zu 2040 vergleichbaren Niveau bleibt. Welches Potenzial daraus erwächst, wird in Kapitel 4.1 näher evaluiert.

Abbildung 3-6: Lithiumbedarf für Batterien E-Fahrzeuge



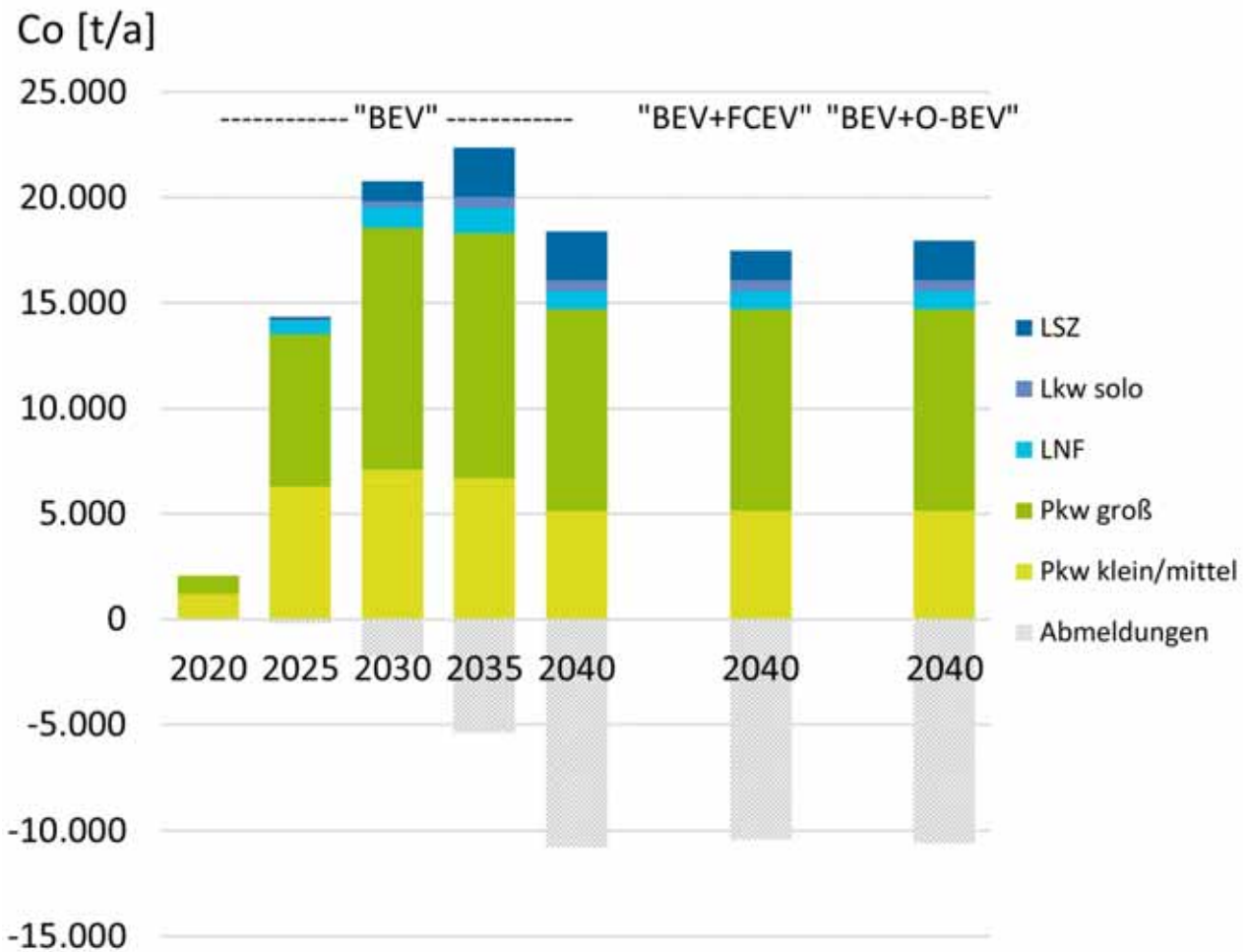
LSZ: Last- und Sattelzüge, Lkw solo: Lkw ohne Anhänger, LNF: Leichte Nutzfahrzeuge

Quelle: Eigene Berechnungen

Der jährliche Kobaltbedarf wird in Abbildung 3-7 dargestellt. Anders als beim Lithiumbedarf ist hier eine deutliche Abnahme nach 2035 sichtbar. So sinkt der prognostizierte Bedarf um rund 4.000 t/a von 22.400 t/a im Jahr 2035 auf 18.400 t/a im Jahr 2040. Dies ist neben der stagnierenden Nachfrage darauf zurückzuführen, dass der Marktanteil an kobaltarmen (NMC811) als auch an komplett kobaltfreien (LFP) Lithium-Ionen-Batterien steigt. Basierend auf den kleineren in FCEV und O-BEV Fahrzeugen verbauten Batterien geht der Bedarf nach Kobalt in den Szenarien mit Antriebsmix leicht zurück. 2040 sind dies im „BEV+FCEV“-Szenario etwa 900 Tonnen pro Jahr und etwa 400 Tonnen pro Jahr im „BEV+O-BEV“-Szenario im Vergleich zum „BEV“ Szenario.

Die jährliche Menge an Kobalt in abgemeldeten Fahrzeugen liegt 2040 bei 10.800 t/a und 2045 bei 15.500 t/a, während die Nachfrage bis 2045 weiter sinkt. Welches Potenzial daraus erwächst, wird in Kapitel 4.1 näher evaluiert.

Abbildung 3-7: Kobaltbedarf für Batterien E-Fahrzeuge



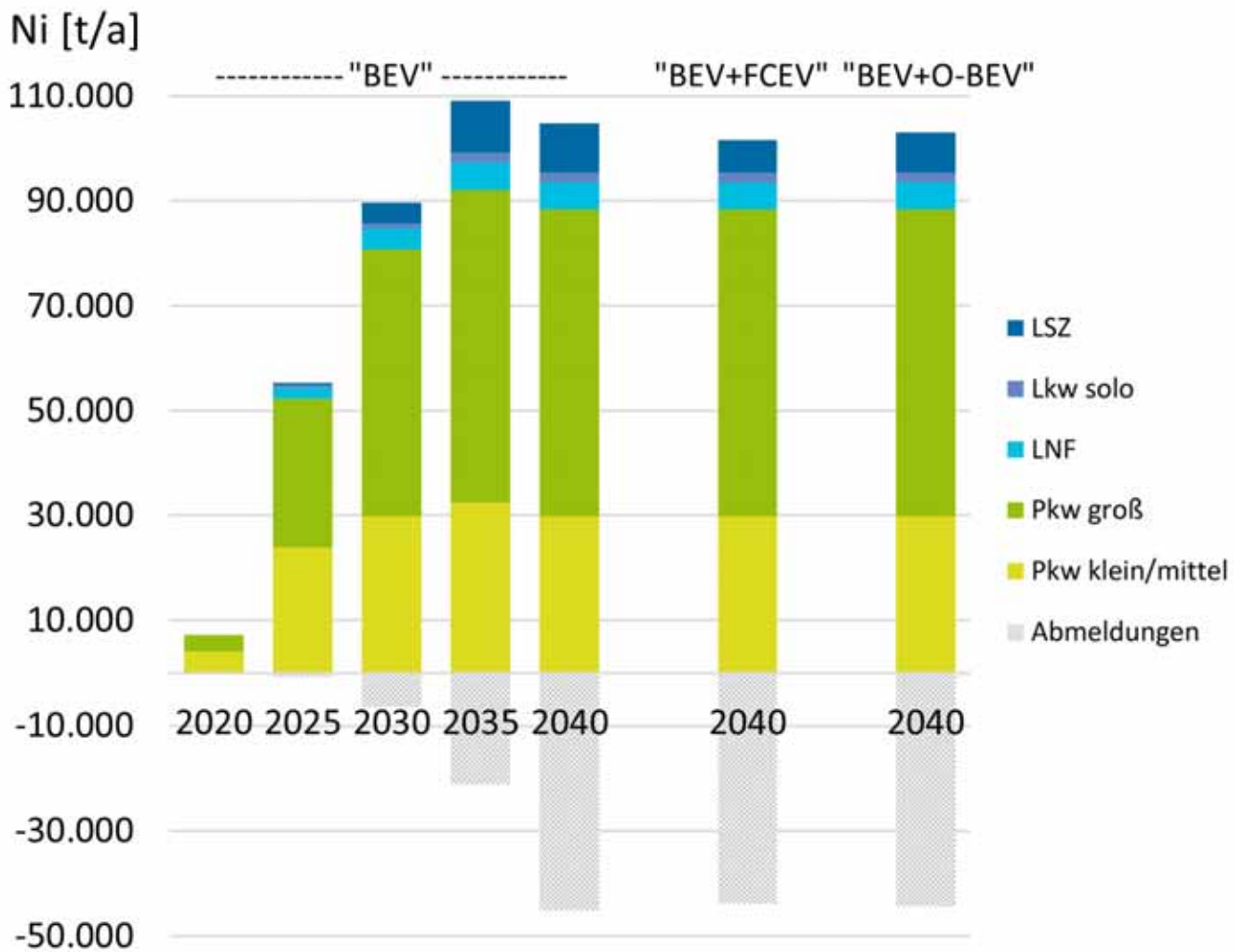
LSZ: Last- und Sattelzüge, Lkw solo: Lkw ohne Anhänger, LNF: Leichte Nutzfahrzeuge

Quelle: Eigene Berechnungen

Der prognostizierte jährliche Nickelbedarf der Batterien in Elektrofahrzeugen welche neu in Deutschland zugelassen werden ist in Abbildung 3-8 abgebildet. Im Jahr 2035 liegt der Bedarf bei ca. 109.100 t/a. Zwischen 2035 bis 2040 ist ein leichter Rückgang um 4.300 t/a auf 104.800 t/a zu erwarten, dieser Trend setzt sich fort und führt zu einem jährlichen Nickelbedarf von 102.000 t/a im Jahr 2045. Die Reduktion ergibt sich aus dem wachsenden Marktanteil von nickelfreien LFP-Batterien, jedoch wird dieser Trend durch den prozentualen Anstieg des Marktanteils von nickelreichen NMC811-Batterien abgemildert. Wie auch bei den anderen betrachteten Materialien führen die kleineren in FCEV und O-BEV Fahrzeugen verbauten Batterien zu einer Reduktion des jährlichen Nickelbedarfs in den Szenarien mit Antriebsmix. Die Reduktion liegt im Jahr 2040 im „BEV+FCEV“-Szenario bei etwa 3.300 Tonnen pro Jahr und etwa 1.800 Tonnen pro Jahr im „BEV+O-BEV“-Szenario im Vergleich zum „BEV“ Szenario.

Die jährliche Menge an Nickel in abgemeldeten Fahrzeugen steigt bis 2040 kontinuierlich an und liegt 2040 bei ca. 45.100 t/a und steigt auf 69.300 t/a bis zum Jahr 2045 an. Welches Potenzial daraus erwächst, wird in Kapitel 4.1 näher evaluiert.

Abbildung 3-8: Nickelbedarf für Batterien E-Fahrzeuge



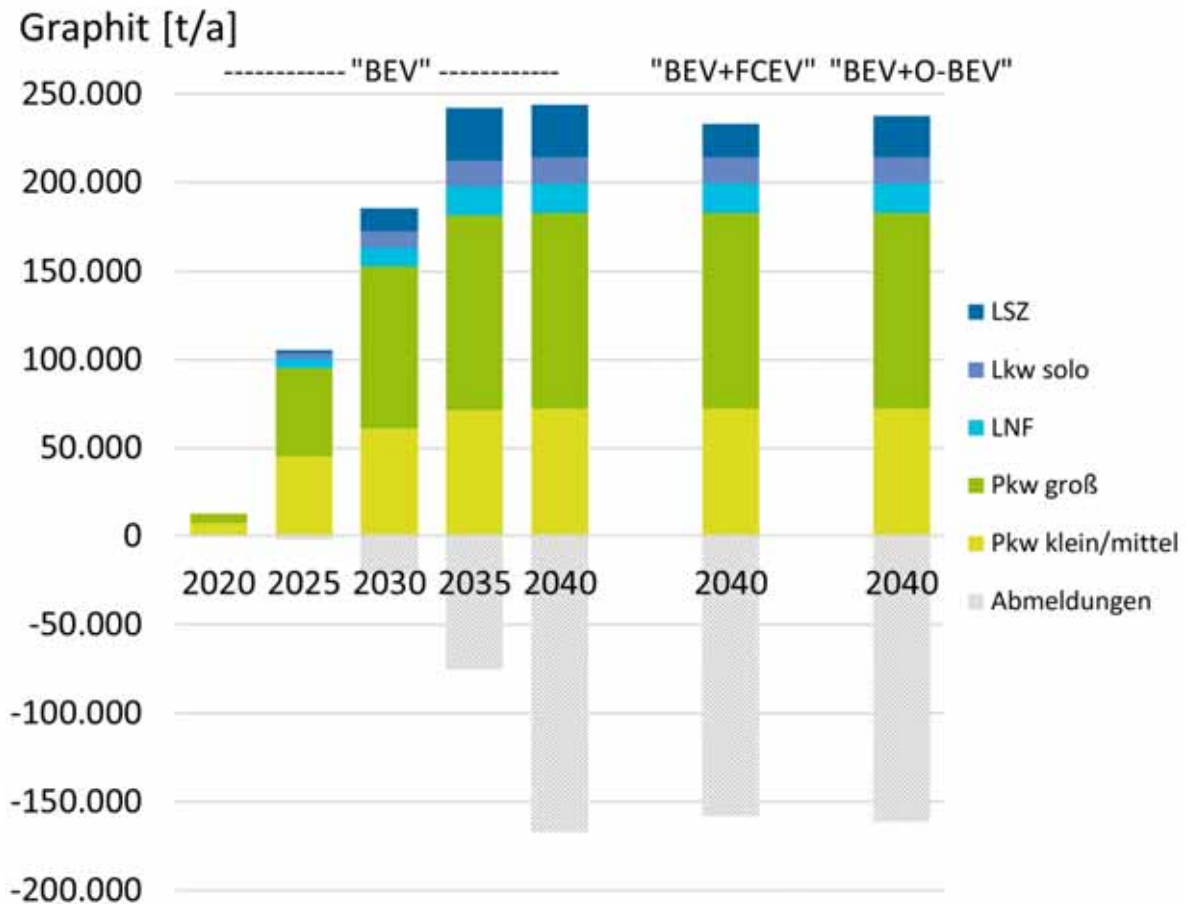
LSZ: Last- und Sattelzüge, Lkw solo: Lkw ohne Anhänger, LNF: Leichte Nutzfahrzeuge

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 3-9 zeigt den jährlichen Graphitbedarf durch Neuzulassungen in Deutschland. Bis 2035 steigt der Bedarf an auf insgesamt 242.200 t/a. Nach 2035 steigt der jährliche Bedarf nur noch geringfügig an auf 244.000 t/a im Jahr 2040 und 249.000 t/a im Jahr 2045. Der Trend hin zu LFP-Batterien sorgt bei gleichbleibenden Neuzulassungen für einen leichten Anstieg des Graphitbedarfs, da LFP-Zellen energiebezogen etwas mehr Graphit benötigen. Die kleineren in FCEV und O-BEV Fahrzeugen verbauten Batterien führen zu einer Reduktion des jährlichen Graphitbedarfs in den Szenarien mit Antriebsmix. Der Nachfragereduktion liegt im Jahr 2040 für das „BEV+FCEV“-Szenario bei etwa 11.200 t/a und für das „BEV+O-BEV“-Szenario bei etwa 6.300 t/a im Vergleich zum „BEV“ Szenario.

Die jährliche in abgemeldeten Fahrzeugen anfallende Menge an Graphit steigt bis 2040 kontinuierlich an und liegt 2040 bei gut 150.000 t/a und 2045 sogar bei über 259.000 t/a.

Abbildung 3-9: Graphitbedarf für Batterien E-Fahrzeuge



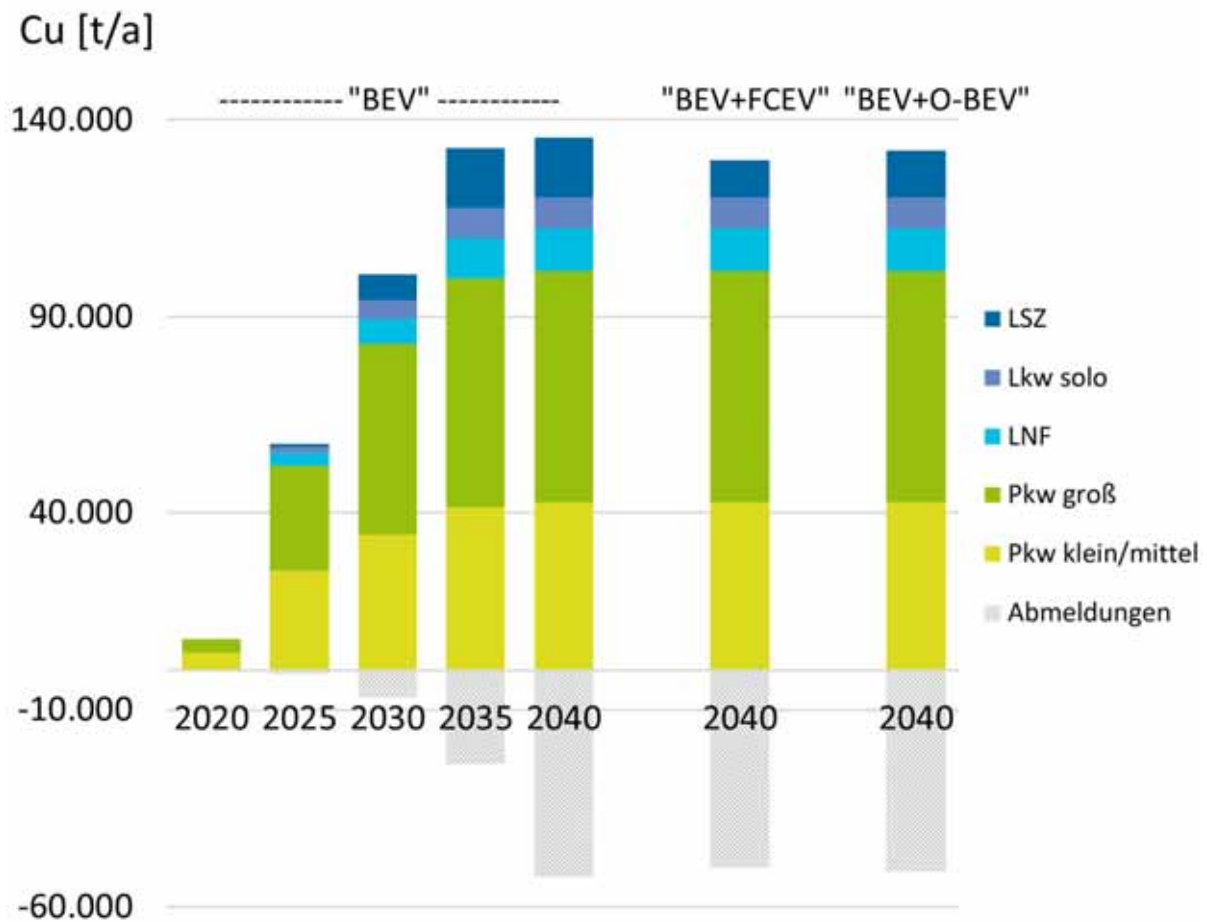
LSZ: Last- und Sattelzüge, Lkw solo: Lkw ohne Anhänger, LNF: Leichte Nutzfahrzeuge

Quelle: Eigene Berechnungen

Der jährliche Kupferbedarf der Batterien in neu zugelassenen Elektrofahrzeugen in Deutschland wird in Abbildung 3-10 gezeigt. Bis 2035 wird ein stark steigender jährlicher Bedarf prognostiziert auf etwa 132.800 t/a. Nach 2035 steigt der Bedarf weniger stark an und liegt 2040 voraussichtlich bei ca. 135.400 t/a und bei 139.800 t/a im Jahr 2045. Der geringfügige Anstieg nach 2035 resultiert aus einem höheren Marktanteil von LFP-basierten Batteriesystemen, welche pro kWh mehr Kupfer benötigen bei gleichbleibender Nachfrage nach Fahrzeugen. Basierend auf den kleineren in FCEV und O-BEV Fahrzeugen verbauten Batterien geht der Bedarf nach Kupfer in den Szenarien mit Antriebsmix leicht zurück. 2040 sind dies im „BEV+FCEV“-Szenario etwa 129.700 t/a und etwa 132.200 t/a im „BEV+O-BEV“-Szenario im Vergleich zum „BEV“ Szenario.

Die Menge an Kupfer in Batterien in abgemeldeten Fahrzeugen steigt bis 2040 kontinuierlich an und liegt dann bei ca. 52.500 Tonnen pro Jahr. Bis 2045 wird ein weiterer Anstieg auf 82.200 t/a prognostiziert. Welches Potenzial daraus erwächst, wird in Kapitel 4.1 näher evaluiert.

Abbildung 3-10: Kupferbedarf für Batterien E-Fahrzeuge



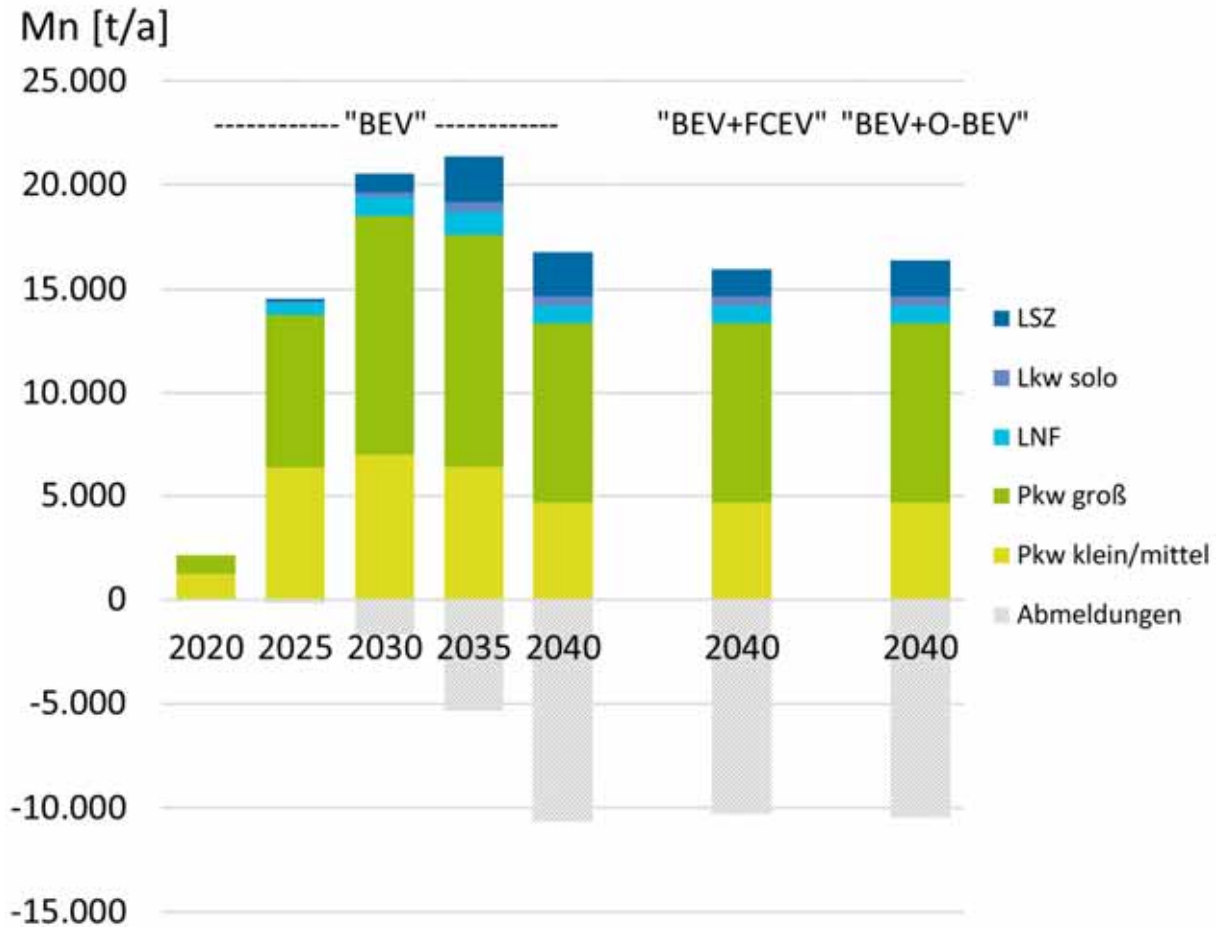
LSZ: Last- und Sattelzüge, Lkw solo: Lkw ohne Anhänger, LNF: Leichte Nutzfahrzeuge

Quelle: Eigene Berechnungen

Der jährliche Manganbedarf wird in Abbildung 3-11 dargestellt. Analog zum Kobaltbedarf ist eine deutliche Abnahme nach 2035 sichtbar. So sinkt der prognostizierte Bedarf um 4.600 t/a von 21.400 t/a im Jahr 2035 auf 16.800 t/a im Jahr 2040 und nimmt weiter ab auf 12.500 t/a im Jahr 2045. Dies ist neben der stagnierenden Nachfrage darauf zurückzuführen, dass der Marktanteil an manganarmen (NMC811) und an manganfreien (LFP) Lithium-Ionen-Batterien steigt. Basierend auf den kleineren in FCEV und O-BEV Fahrzeugen verbauten Batterien geht der Bedarf nach Mangan in den Szenarien mit Antriebsmix leicht zurück. 2040 sind dies im „BEV+FCEV“-Szenario etwa 800 t/a und etwa 400 t/a im „BEV+O-BEV“-Szenario im Vergleich zum „BEV“ Szenario.

Die Menge an Mangan in Batterien in abgemeldeten Fahrzeugen steigt bis 2040 kontinuierlich an und liegt dann bei ca. 10.000 t/a und bei ca. 15.000 t/a im Jahr 2045.

Abbildung 3-11: Manganbedarf für Batterien E-Fahrzeuge

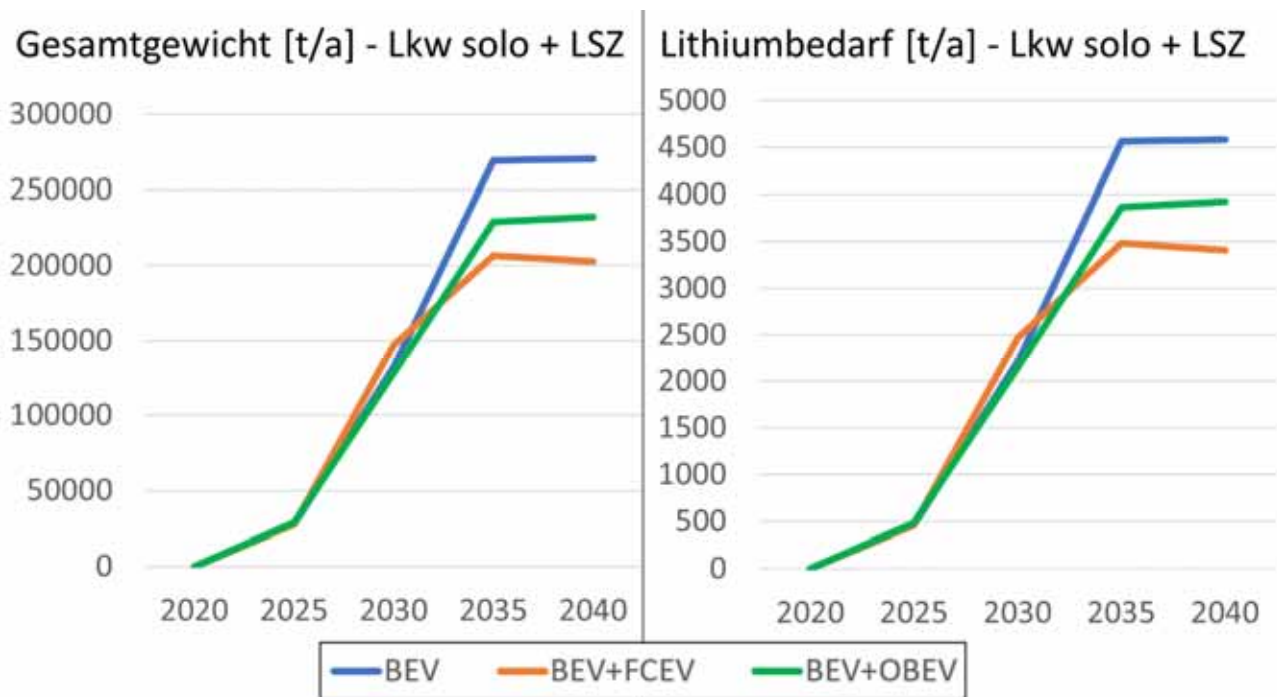


LSZ: Last- und Sattelzüge, Lkw solo: Lkw ohne Anhänger, LNF: Leichte Nutzfahrzeuge

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 3-12 zeigt die Prognose des jährlichen Materialbedarfs für die Batterien in neu zugelassenen Lkws und Last- und Sattelzügen (LSZ). In der Abbildung wird das Gesamtgewicht der Batterien als auch speziell der Lithiumbedarf für die Jahre 2020 bis 2040 dargestellt. Die Elektrifizierung der Lkw Flotte läuft zeitversetzt zur Elektrifizierung der Pkw Flotte hoch. Folglich ist der Anstieg des Bedarfs vor 2025 noch sehr gering und keine Unterschiede zwischen den Szenarien erkennbar. Ab 2025 steigt der Bedarf dann in allen Szenarien stark an und es sind Unterschiede in den Szenarien erkennbar. Zunächst steigt der Materialbedarf im „BEV+FCEV“-Szenario am stärksten an. 2030 liegt der gesamte Materialbedarf im „BEV+FCEV“-Szenario bei 146.900 t/a, davon sind 2.500 t/a Lithium. Die Szenarien „BEV“ und „BEV + O-BEV“ liegen etwas niedriger bei 132.100 t/a beziehungsweise 128.300 t/a. Bis 2035 kommt es in allen Szenarien zu einem weiteren Anstieg des Materialbedarfs. Allerdings ist der Anstieg im „BEV+FCEV“-Szenario am geringsten und der Anstieg im reinen „BEV“-Szenario am steilsten. Im Jahr 2035 liegt der gesamte Materialbedarf im „BEV“-Szenario bei ca. 269.400 t/a (ca. 4.600 t/a Li), im „BEV + O-BEV“-Szenario bei 228.900 t/a (3.900 t/a Li) und im „BEV+FCEV“-Szenario bei 206.800 t/a (3.500 t/a Li). Zwischen 2035 und 2040 verändert sich der Materialbedarf nur geringfügig in allen drei Szenarien. In den „BEV“ und „BEV + O-BEV“-Szenarien steigt die Nachfrage auf 270.700 t/a (4.600 t/a Li) und 232.400 t/a (3.900 t/a Li). Im „BEV+FCEV“-Szenario sinkt der prognostizierte Materialbedarf geringfügig und liegt im Jahr 2040 bei 202.700 t/a (3.400 t/a Li).

Abbildung 3-12: Gesamtgewicht und Lithiumbedarf für Batterien E-Lkw



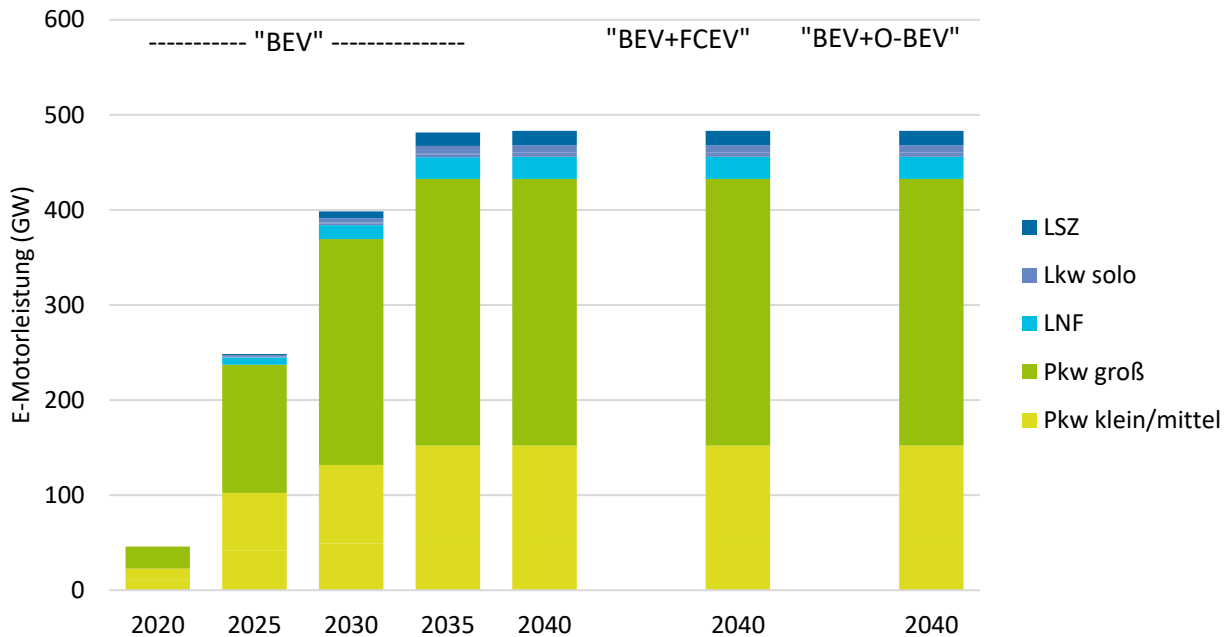
LSZ: Last- und Sattelzüge, Lkw solo: Lkw ohne Anhänger, LNF: Leichte Nutzfahrzeuge

Quelle: Eigene Berechnungen

3.3 Rohstoffnachfrage für Elektromotoren

Die Gesamtnachfrage an Elektromotoren, die sich aus den Markthochlauf-Szenarien und den in Tabelle 2-3 aufgeführten Annahmen ableitet, zeigt Abbildung 3-13. Die Elektrifizierung der Pkw- und Lkw-Flotten führt zu einer rasch steigenden Nachfrage an Elektromotorleistung von 46 GW im Jahr 2020 auf knapp 400 GW im Jahr 2030 und auf 483 GW im Jahr 2035. Dabei wird die Nachfrage trotz zunehmender Neuzulassungen von E-Lkw auch längerfristig zu über 90 % durch das Pkw-Segment bestimmt. Erneut spielen hier insbesondere die „Pkw groß“ eine dominierende Rolle. Da alle Antriebe je Größenklasse die gleiche Motorleistung aufweisen, gibt es keine Unterschiede zwischen den Szenarien.

Abbildung 3-13: Bedarf an E-Motorleistung für E-Fahrzeuge



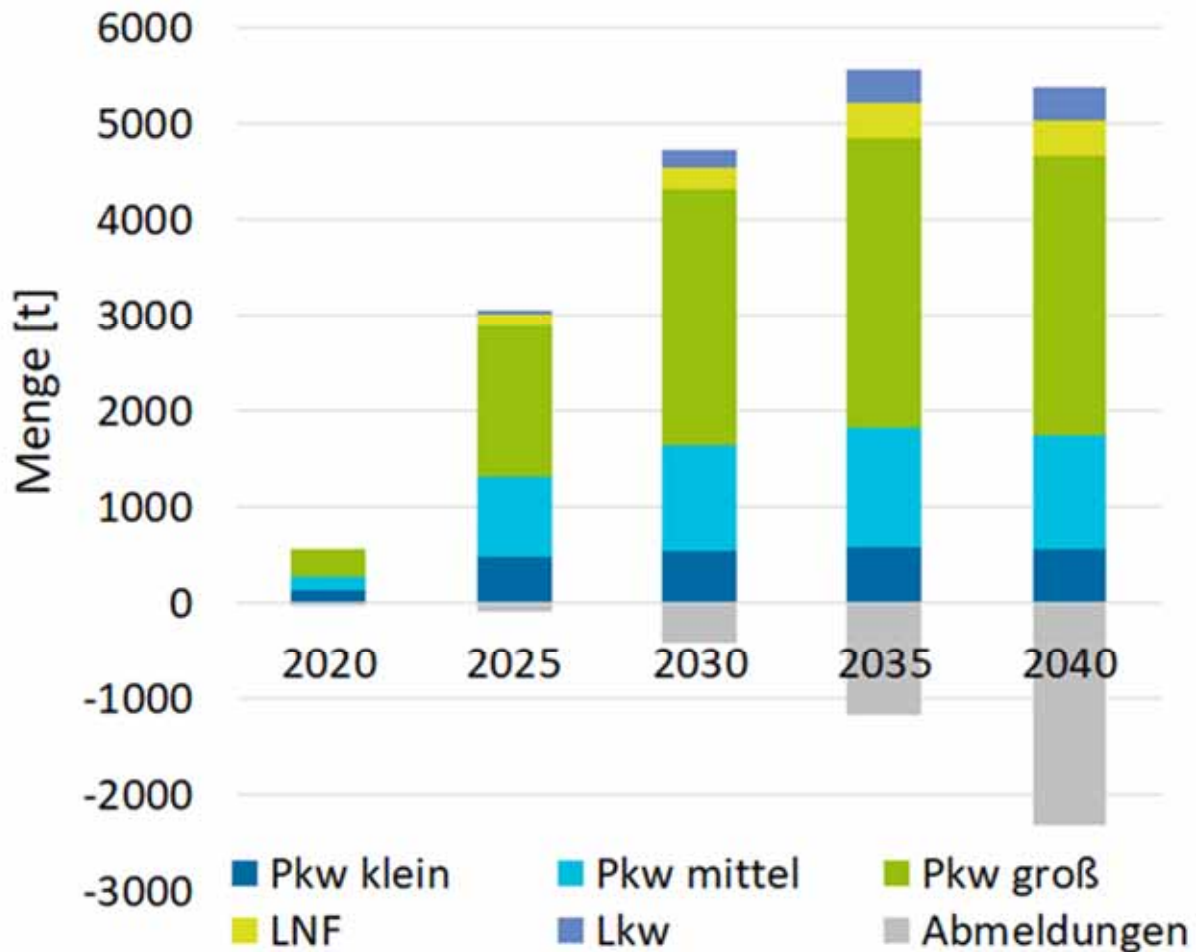
LSZ: Last- und Sattelzüge, Lkw solo: Lkw ohne Anhänger, LNF: Leichte Nutzfahrzeuge

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Marktanteil des Typs permanenterregter Synchronmotor (PMSM) für Elektromotoren von elektrisch angetriebenen Pkw liegt aktuell bei rund 95 % [ERMA 2021]. Nach aktuellen Quellen, die Experteneinschätzungen berücksichtigen, wird sich dieser Anteil bis 2040 nur moderat auf rund 80 % Marktanteil verringern [SKN 2023]. Die permanenterregten Synchronmotoren für E-Fahrzeuge enthalten als Permanentmagnete die besonders leistungsstarken Neodym-Eisen-Bor-Magnete. Andere Elektromotortypen sind entweder Asynchronmotoren (ASM) oder fremderregte Synchronmotoren (EESM). Diese benötigen keine Permanentmagnete, allerdings ist der spezifische Kupferbedarf hier höher. Die permanenterregten Synchronmotoren zeigen jedoch Vorteile bzgl. Gewicht und Volumen sowie elektrischem Wirkungsgrad. Dies erklärt den hohen und auch für die Zukunft erwarteten hohen Marktanteil der PMSM [SKN 2023]. Das Öko-Institut geht aufgrund der besonders hohen Anforderungen für alle elektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge von 100 % Marktanteil von PMSM über den Szenariozeitraum aus. Die Fachleute aus dem begleitenden Stakeholder-Workshops hatten bzgl. dieser Annahme keine anderen Einschätzungen.

Für die leistungsbezogenen Gewichte und Materialzusammensetzungen der PMSM wurde auf ein detailliertes generisches Modell [Nordelöf et al. 2017] zurückgegriffen. Je nach Motorleistung kann demnach bei den PMSM mit Magnetgewichten von rund 1,0 bis 2,5 kg je Fahrzeug ausgegangen werden. In der nachfolgenden Abbildung ist der entsprechende Bedarf an Permanentmagneten für die Pkw- und Lkw-Neuzulassungen in Deutschland zwischen 2020 und 2040 dargestellt. Da die unterschiedlichen Antriebe bei den Nutzfahrzeugen (BEV, FCEV, OBEV) keine Unterschiede bei den Elektromotoren bewirken, gilt die Bedarfsentwicklung gleichermaßen für alle drei Szenarien.

Abbildung 3-14: Tonnagen der Permanentmagnete in Fahrzeug-Neuzulassungen und -Abmeldungen



LNF = Leichte Nutzfahrzeuge

Quelle: Eigene Berechnungen

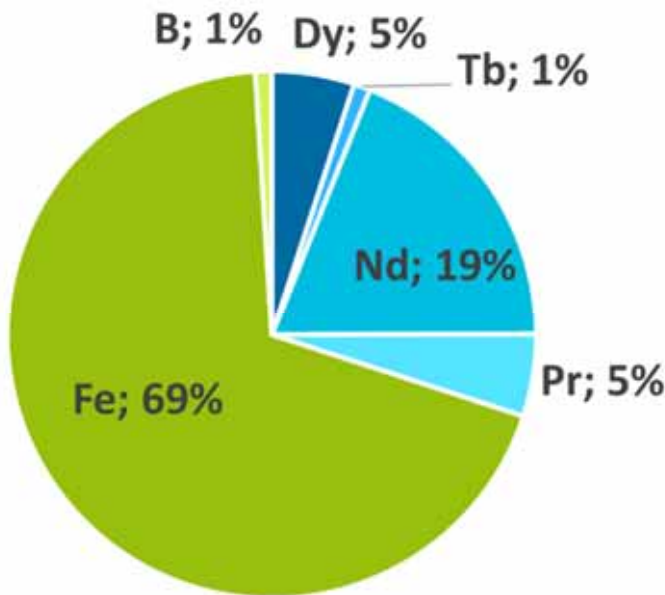
Neben den Bedarfsmengen an Permanentmagneten für die Pkw- und Lkw-Neuzulassungen sind in der obigen Abbildung auch die Tonnagen an Permanentmagneten, die durch Abmeldungen der Kreislaufwirtschaft über den Szenariozeitraum 2020 – 2040 zur Verfügung stehen, dargestellt.

Aus den Szenarienergebnissen geht hervor, dass der jährliche Bedarf an Permanentmagneten für die Elektromotoren für die Pkw- und Lkw-Neuzulassungen in Deutschland von rund 500 t im Jahr 2020 auf rund 5.500 t bis zum Jahr 2035 ansteigt. Der danach sehr moderate Rückgang bis 2040 ist auf den etwas steigenden Marktanteil anderer Elektromotoren bei den Pkw-Neuzulassungen zurückzuführen. Die Mengenentwicklungen der Permanentmagnete aus abgemeldeten Fahrzeugen („Abmeldungen“) steigen von einem sehr geringen Niveau im Jahr 2020 bis 2040 auf deutlich über 2.000 Tonnen im Jahr an. Dieses wachsende Potenzial an Permanentmagneten aus End-of-Life-Elektromotoren stellt mittel- und langfristig ein zunehmend attraktives Sekundärrohstoffpotenzial dar. Hierauf wird in Abschnitt 4 näher eingegangen.

Wie bereits geschildert werden Permanentmagnete für die Antriebsmotoren von Elektrofahrzeugen stets von den besonders leistungsstarken Neodym-Eisen-Bor-Magneten gestellt. Gesinterte Neodym-Eisen-Bor-Magnete sind die mit Abstand leistungsstärksten Permanentmagnete, die seit über

30 Jahren in diversen Anwendungen zum Einsatz kommen. In der nachfolgenden Abbildung ist eine durchschnittliche Zusammensetzung der Neodym-Eisen-Bor-Magnete in Elektromotoren für Fahrzeuge dargestellt.

Abbildung 3-15: Zusammensetzung Permanentmagnete in Elektromotoren in Gew%



Fe = Eisen, B = Bor, Nd = Neodym, Pr = Praseodym, Dy = Dysprosium, Tb = Terbium

Quelle: Eigene Berechnungen nach [SKN 2023]

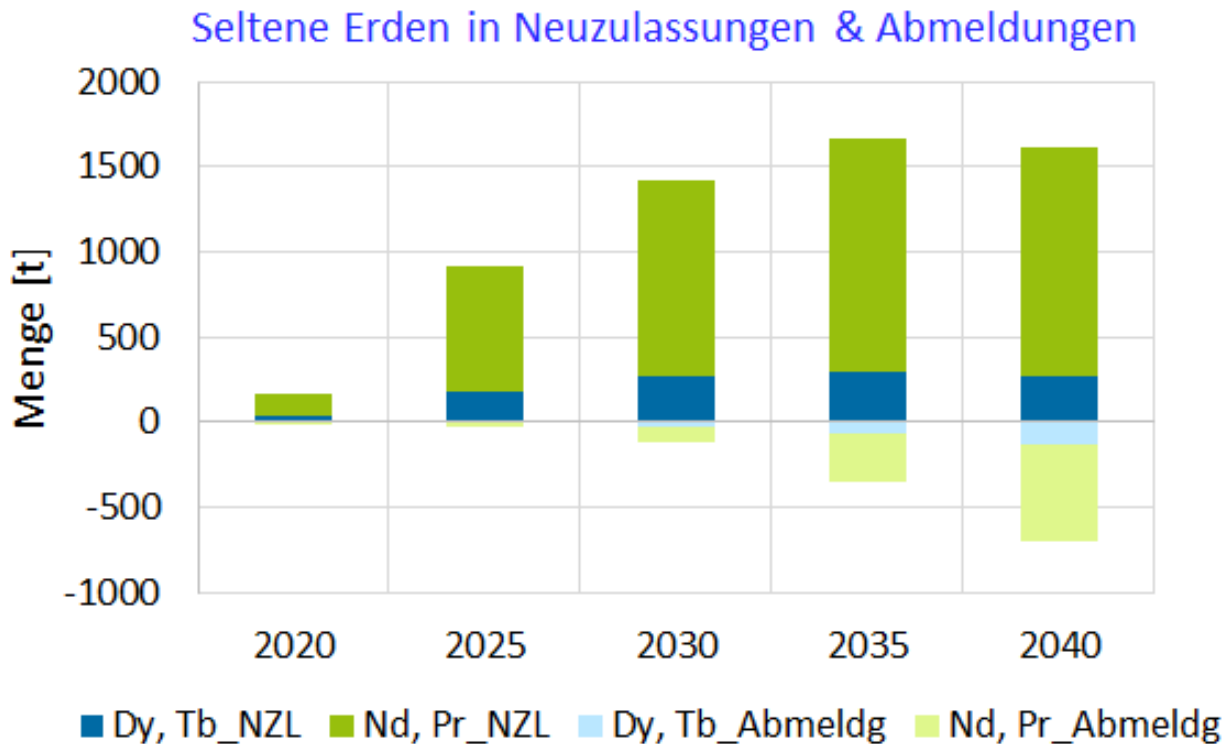
Neben rund 69 Gew% Eisen und 1 Gew% Bor besteht die Legierung für diese Neodym-Eisen-Bor-Magnete aus rund 30 Gew% Seltenen Erden. Davon entfallen die größeren Anteile auf die beiden Leichten Seltenen Erden Neodym und Praseodym (zusammen rund 24 Gew%) und auf die beiden Schweren Seltenen Erden Dysprosium und Terbium (zusammen rund 6 %). Die besonders aufwendig herzustellenden und damit tendenziell teureren Schweren Seltenen sind notwendig für die Sicherstellung der Temperaturstabilität der Permanentmagnete und damit der technischen Funktionalität des Elektromotors insgesamt. In den letzten Jahren wurde durch Innovationen in der Magnetforschung und -entwicklung der notwendige Anteil der Schweren Seltenen Erden in den Magnetlegierungen bereits etwas reduziert. Die durchschnittliche Zusammensetzung (siehe Abbildung oben) spiegelt den aktuellen Stand wider. Für den Szenariozeitraum wird in Anbetracht weiterer Aktivitäten von Magnet- und Motorenherstellern für den Dysprosiumgehalt bis 2040 eine weitere moderate Reduktion um 25 % gegenüber dem heutigen Gehalt angenommen [SKN 2023].⁹

In der folgenden Abbildung ist entsprechend den Entwicklungen für die Bedarfsmengen an Permanentmagneten die Bedarfsentwicklung für Leichte (Neodym, Praseodym) und Schwere (Dysprosium und Terbium) Seltene Erden für die Pkw- und Lkw-Neuzulassungen in Deutschland bis 2040 aufgeführt. Ausgehend von einem bescheidenen Niveau im Jahr 2020 (rund 150 Tonnen Seltenen Erden insgesamt) steigt der Bedarf bis 2035 auf über 1.500 Tonnen im Jahr steil an und sinkt danach bis 2040 nur noch sehr moderat aufgrund der angenommenen leicht sinkenden Anteile von Motoren mit

⁹ Entsprechend steigt der Anteil der Leichten Seltenen Erden in der Magnetlegierung leicht an.

Permanentmagneten im Markt. Bei den Mengenentwicklungen an Seltenen Erden aus abgemeldeten Fahrzeugen mit Elektromotoren steigt die Größenordnung – ausgehend von verschwindend geringen Mengen im Jahr 2020 – bis auf rund 650 Tonnen Seltenen Erden im Jahr 2040 an.

Abbildung 3-16: Tonnagen Seltene Erden in Fahrzeug-Neuzulassungen und Fahrzeug-Abmeldungen



Dy = Dysprosium, Tb = Terbium, Nd = Neodym, Pr = Praseodym, NZL = Neuzulassungen

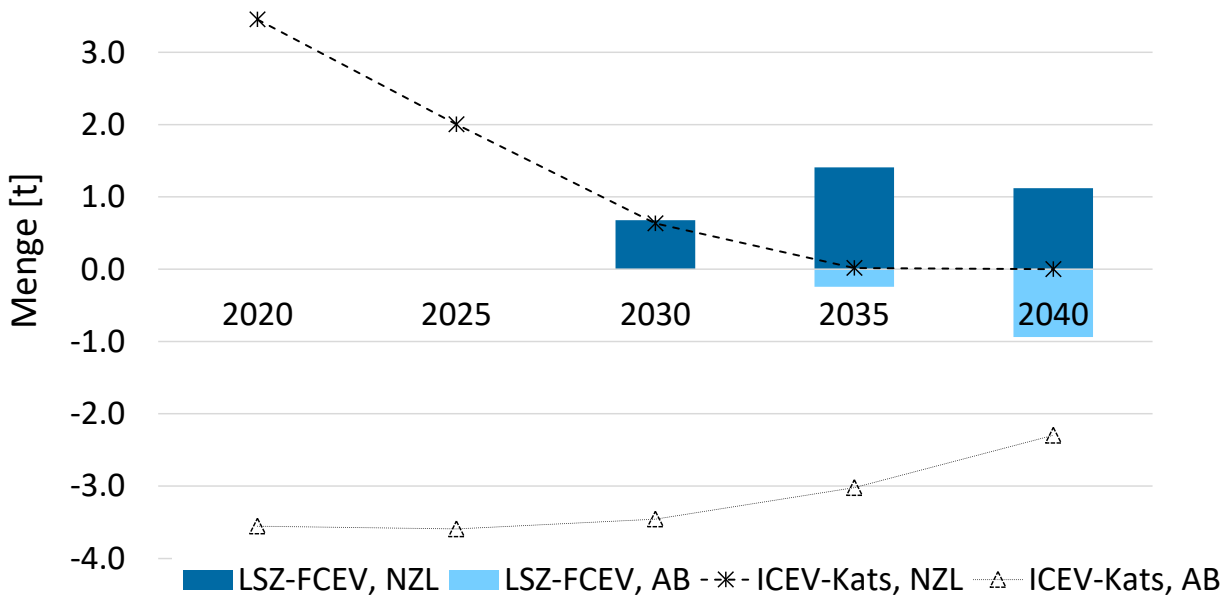
Quelle: Eigene Berechnungen

In Abschnitt 4 wird nicht zuletzt auf das Recyclingpotenzial bzgl. der strategisch sehr wichtigen und ökonomisch attraktiven Seltenen Erden näher eingegangen.

3.4 Platinbedarf für Brennstoffzellen

Die Entwicklung der Platinnachfrage für Brennstoffzellen-Lkw zeigt Abbildung 3-17. Entsprechend dem Hochlauf der Fahrzeuge steigt die Nachfrage erst ab 2030 an (vgl. Kap. 3.1). 2035 und 2040 liegt die Nachfrage bei etwas über 1 t Platin pro Jahr, wobei die leicht höhere Fahrzeugzahl im Jahr 2040 durch die angenommene sinkende spezifische Platinmenge je Brennstoffzelle überkompensiert wird. Bereits 2035 und v. a. 2040 zeigt sich, dass die Menge an Platin in abgemeldeten Lkw relevant wird, da die Last- und Sattelzüge (LSZ) aufgrund der hohen Laufleistungen eine vergleichsweise geringe Lebensdauer haben. Zudem liegt der Peak der Neuzulassungen von Brennstoffzellen-LSZ zwischen 2030 und 2040, wo zwischen 16.000 und 19.000 Fahrzeuge pro Jahr zugelassen werden (2030: 12.700, 2040: 13.700).

Abbildung 3-17: Platin in Neuzulassungen und Abmeldungen von Brennstoffzellen-Lkw und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (Pkw & Lkw) im Vergleich



LSZ = Last- und Sattelzüge, NZL = Neuzulassungen, AB = Abmeldungen, FCEV = Brennstoffzellenfahrzeug, ICEV = Fahrzeug mit Verbrennungsmotor

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Vergleich mit dem Platineinsatz in Abgaskatalysatoren von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zeigt, dass hier aktuell mit ca. 3 t/a für die Katalysatoren in den Neuzulassungen die Nachfrage noch deutlich höher ist. Basierend auf den dieser Studie zugrunde liegenden Hochlaufszenerarien der Elektromobilität gehen die Neuzulassungen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor jedoch deutlich zurück, so dass im Jahr 2030 ungefähr gleich viel Platin für Verbrennerfahrzeuge eingesetzt wird, wie für Brennstoffzellen-LSZ. Ab 2035 werden keine Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor mehr zugelassen. Die Platinmengen in den Abmeldungen bleiben jedoch bis 2040 bei über 2 t/a, so dass hieraus die Nachfrage nach Platin für die Brennstoffzellenantriebe der LSZ bedient werden könnte. Zudem können die Brennstoffzellen selbst an ihrem Lebensende dem Recycling zugeführt werden, um das eingesetzte Platin zurückzugewinnen.

Die Platinnachfrage für PEM-Elektrolyseure, um den Wasserstoff für die Brennstoffzellen-LSZ bereitzustellen, ist demgegenüber deutlich geringer. Basierend auf den in Kapitel 2.4.2 dargestellten Annahmen zur Zusammensetzung werden größenordnungsmäßig insgesamt ca. 1,4 t Platin zum Aufbau der entsprechenden Infrastruktur benötigt (in den Jahren des Hochlaufes von 2029-2039 im Mittel ca. 0,1 t/a).¹⁰ Dabei ist zu beachten, dass für die Elektrolyseur-Stacks eine Lebenserwartung von ca. 10 Jahren angenommen werden kann [SKN 2023], so dass Rückläufe aus dem Recycling der entsprechenden Infrastruktur erst nach 2040 erwartbar werden.

Der wesentlich kritischere Rohstoff bei PEM-Elektrolyseuren ist Iridium. Der Iridium-Bedarf der PEM-Elektrolyseure zur Bereitstellung des Wasserstoffs für Brennstoffzellen-LSZ würde nach dieser

¹⁰ Wenn man von reinen Wasserstoffimporten aus geographisch für die EE-Strom-Erzeugung günstigeren Regionen ausgeht, wird größenordnungsmäßig ein Bedarf von insgesamt 0.9 t bzw. im Mittel in den Jahren 2029-2039 ca. 0.8 t/a abgeschätzt (vgl. Kap. 2.4.2 und 3.5.2).

Abschätzung (vgl. Tabelle 2-9 und Tabelle 2-10:) bei ca. 2-2,5 t insgesamt bzw. im Mittel ca. 0,15-0,2 t/a im Zeitraum 2029-2039 liegen, was im Vergleich zu einer aktuellen weltweiten Iridiumförderung von 8 t/a steht, die i. W. nicht ausgeweitet werden kann [SKN 2023].

Es ist zu beachten, dass diese Darstellung davon ausgeht, dass bis zum Jahr 2040 durch technischen Fortschritt deutliche Reduktionen bei der Iridium- und Platinbeladung der Elektroden erzielt werden können (jeweils ca. 90 % vgl. Tabelle 2-9). Zudem gibt es andere Sektoren, die Wasserstoff nachfragen. Ein mögliches Mengengerüst basierend auf der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ [SKN & Agora 2021] für die Nachfrage aus den Bereichen Absicherung des Strom- (und Fernwärme-)Systems und der Stahl- und Chemieindustrie wird bspw. in [SKN 2023] vorgestellt.

3.5 Rohstoffnachfrage für zugehörige Energie-Infrastrukturen

Mit der Antriebswende auf elektrische Fahrzeuge geht der Aufbau entsprechender Energie-Infrastrukturen einher. Im Folgenden wird hierzu zunächst aus dem Endenergiebedarf der Fahrzeuge der erforderliche Zubau an Erneuerbaren Energien zur Strom- und ggf. Wasserstoffbereitstellung abgeschätzt und hinsichtlich der Bedarfe an Schlüsselrohstoffen analysiert. Daneben wird mit Fokus auf den Kupferbedarf zusätzlich der Aufbau der direkten Energieversorgungsinfrastrukturen (z. B. Ladepunkte, Oberleitungen) dargestellt.

3.5.1 Endenergiebedarf der Elektrofahrzeuge

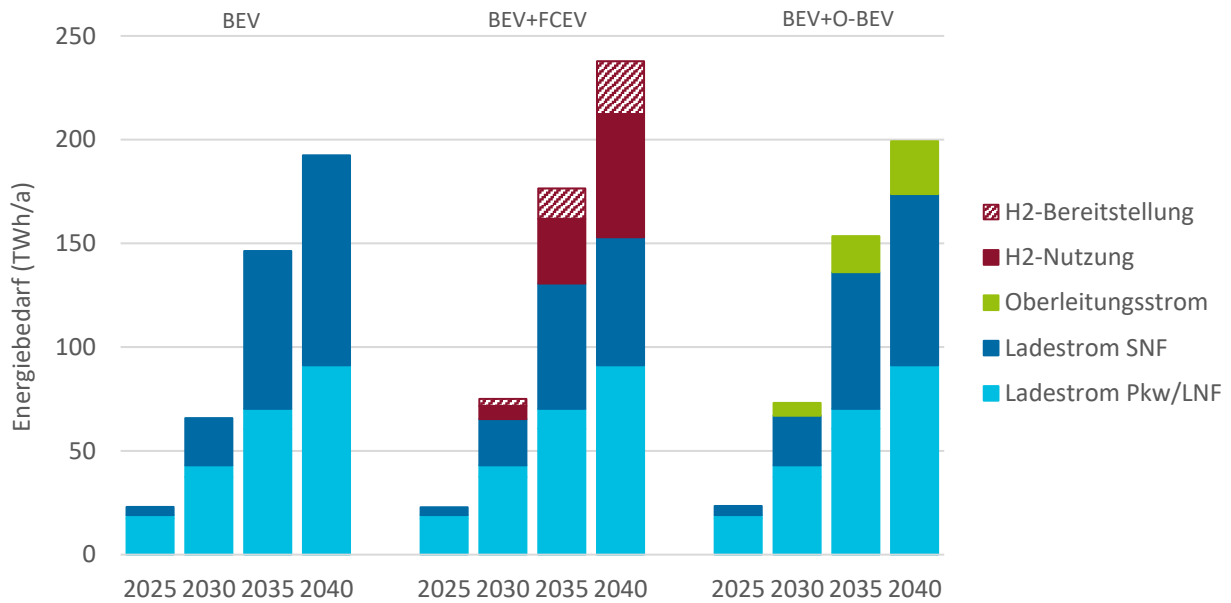
Der in der Markthochlauf-Modellierung ermittelte Endenergiebedarf der Elektrofahrzeuge ist in Abbildung 3-18 dargestellt. Bis zum Jahr 2040 steigt im reinen „BEV“-Szenario der Strombedarf auf 192 TWh. Zum Vergleich lag der Stromverbrauch¹¹ in Deutschland im Jahr 2022 insgesamt bei 484 TWh [BNetzA 2023]. Aus der Elektrifizierung des Straßenverkehrs sowie weiteren Transformationen im Gebäudesektor und anderen Bereichen ergibt sich folglich ein deutlicher Ausbaubedarf Erneuerbarer Energien. Im Straßenverkehr nimmt der Strombedarf insbesondere nach dem Jahr 2030 durch die zunehmende Elektrifizierung der Lkw-Flotten zu. Maken schwere Nutzfahrzeuge heute rund ein Drittel des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor aus, übersteigt die Stromnachfrage ab dem Jahr 2035 in den Szenarien den Strombedarf von Pkw. Grund hierfür ist die gemäß Prognosen kontinuierlich steigende Güterverkehrsleistung gegenüber einer in dieser Studie als stagnierend angenommenen Verkehrsleistung im motorisierten Individualverkehr. Die Ergebnisse legen nahe, dass die sich zunehmend abzeichnende Antriebswende auf elektrische Nutzfahrzeuge in der Planung des zukünftigen Energiesystems berücksichtigt werden sollte.

Im Szenario „BEV + FCEV“ steigt der Endenergiebedarf aufgrund der zusätzlichen Nutzung von Wasserstoff an. Aufgrund der Umwandlungsverluste der Brennstoffzelle in Höhe von mindestens 40 % des Energiegehalts weisen Brennstoffzellenfahrzeuge einen höheren Energieverbrauch auf als BEV. Wird zusätzlich der Strombedarf berücksichtigt, der zu Erzeugung von klimaneutralem Wasserstoff in Elektrolyseanlagen benötigt wird, steigt der Energiebedarf im Jahr 2040 auf knapp 240 TWh, also fast ein Viertel mehr als im reinen „BEV“-Szenario. Im Szenario „BEV + O-BEV“ ergibt sich nur ein geringfügig höherer Strombedarf gegenüber dem reinen „BEV“-Szenario, der aus höheren Energieverlusten bei der dynamischen Stromübertragung resultiert und einem leicht

¹¹ Die Ausbauziele erneuerbarer Energien beziehen sich auf den Bruttostromverbrauch, der zusätzlich u. a. die Kraftwerkseigenverbräuche erfasst. Der Bruttostromverbrauch lag im Jahr 2022 bei 549 TWh [UBA 2023]

erhöhten Energieverbrauch während der Fahrt in Folge von strömungsinduzierten Verlusten an dem ausgefahrenen Stromabnehmer.

Abbildung 3-18: Jährlicher Energiebedarf für E-Fahrzeuge im Vergleich der Szenarien



SNF: Schwere Nutzfahrzeuge, LNF: Leichte Nutzfahrzeuge

Wirkungsgrad zur Berechnung des Strombedarfs zur H₂-Bereitstellung: 0,65 bis 0,7 in den Jahren 2030 bis 2040

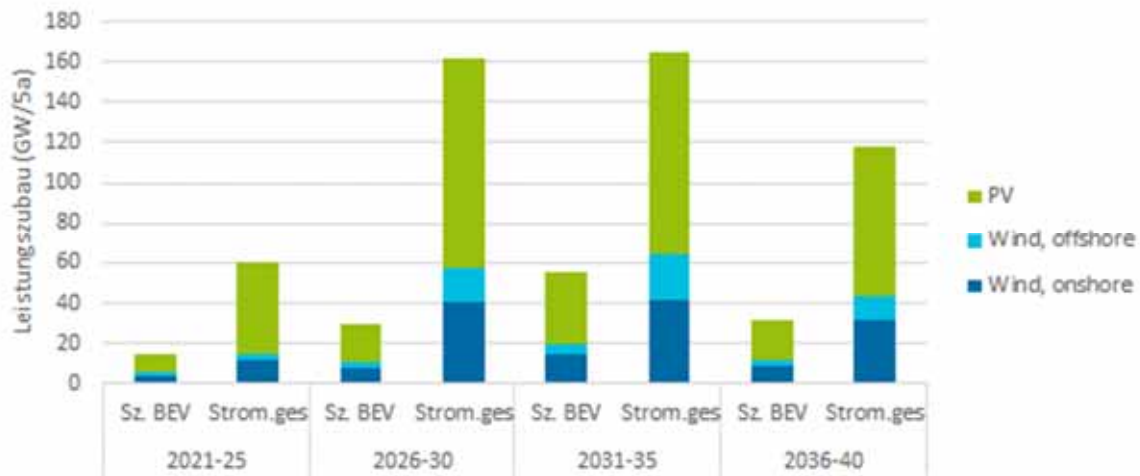
Inklusive von Ladeverlusten in Höhe von 11 % und Energieverlusten bei der Stromübertragung an Oberleitungen von 17 %.

Quelle: Eigene Berechnungen

3.5.2 Rohstoffbedarf für den Zubau an Erneuerbaren Energien

Basierend auf der in Kapitel 2.4.2 dargestellten Herangehensweise wurde der Zubaubedarf an Windkraftanlagen und Photovoltaik abgeschätzt, der nötig ist, um eine erneuerbare Stromversorgung der Elektromobilität zu gewährleisten. Dabei wurde mit den in Tabelle 2-5 dargestellten mittleren Erzeugungsanteilen der EE-Anlagen und den dazugehörigen Volllaststunden der aus dem Verkehrssektor nachgefragte steigende Strombedarf anhand des Hochlaufs (vgl. Abbildung 3-18) in erforderlichen Zubau umgerechnet. Das Ergebnis ist illustrativ zu betrachten, da die Dynamik des Zubaus von EE-Anlagen für das Gesamtsystem zusätzlich von den Bedarfen in anderen Sektoren abhängt. Entsprechend wird in der Darstellung auf eine jahresscharfe Auflösung verzichtet und der für die Elektromobilität ermittelte Bedarf kumuliert in 5 Jahresintervallen aufgeführt. Nach Abgleich mit [Harthan et al. 2023] ergibt sich eine ähnliche Tendenz zum gesamten EE-Zubau für alle Sektoren mit einem Peak in den Jahren 2026-35. Abbildung 3-19 zeigt den Verlauf beispielhaft für das Szenario „BEV“ im Vergleich mit dem gesamten Stromsystem. Unterschiede zwischen den Szenarien werden nachfolgend diskutiert.

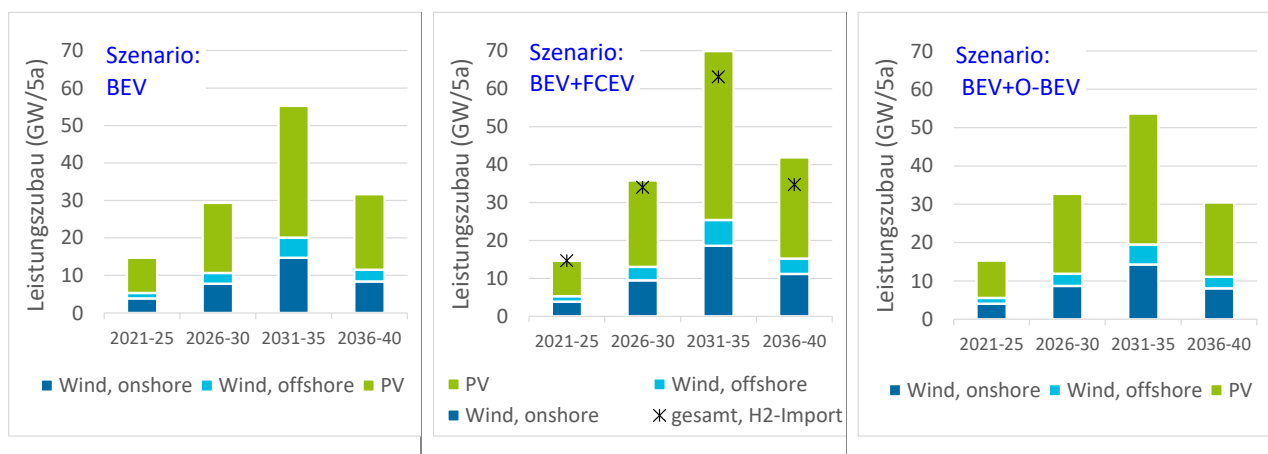
Abbildung 3-19: PV- und Wind-Zubau für E-Mobilität (Szenario „BEV“) und gesamtes Stromsystem



Quelle: Sz. BEV: eigene Berechnungen, Strom.ges: Harthan et al. 2023

In Abbildung 3-20 ist der Zubau für die Nachfrage aus dem Verkehrssektor kumuliert in 5-Jahresintervallen für die drei in dieser Studie betrachteten E-Mobilitäts-Szenarien gegenübergestellt. Die Szenarien „BEV“ und „BEV+O-BEV“ zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf. Im Szenario „BEV+FCEV“ ergibt sich insbesondere im Zeitraum 2031-35 und 2036-40 ein höherer Bedarf, da vorwiegend dort die brennstoffzellengetriebenen Lkw in den Markt kommen, die aufgrund der Umwandlungsverluste eine höhere Stromnachfrage bedingen (vgl. auch Kapitel 2.4.2). Insgesamt ergibt sich für den gesamten Zeitraum des Hochlaufes der Elektromobilität ein Zubau von ca. 130 GW (Szenarien „BEV“ und „BEV+O-BEV“) bzw. ca. 160 GW (Szenario „BEV+FCEV“ mit H₂-Erzeugung in DE). Orientierend wird für das Szenario „BEV+FCEV“ auch der Zubaubedarf dargestellt, der bei alleinigem Import von Wasserstoff für die brennstoffzellengetriebenen Lkw entsteht. Durch höhere Volllaststunden an global günstigeren Standorten (Annahmen s. Kapitel 2.4.2) wird hier ein etwa 10 % niedrigerer Zubaubedarf (bezogen auf den gesamten Zubau für alle Fahrzeuge) abgeschätzt (insges. Ca. 145 GW, in Abbildung 3-20 mit „Stern“ gekennzeichnet).

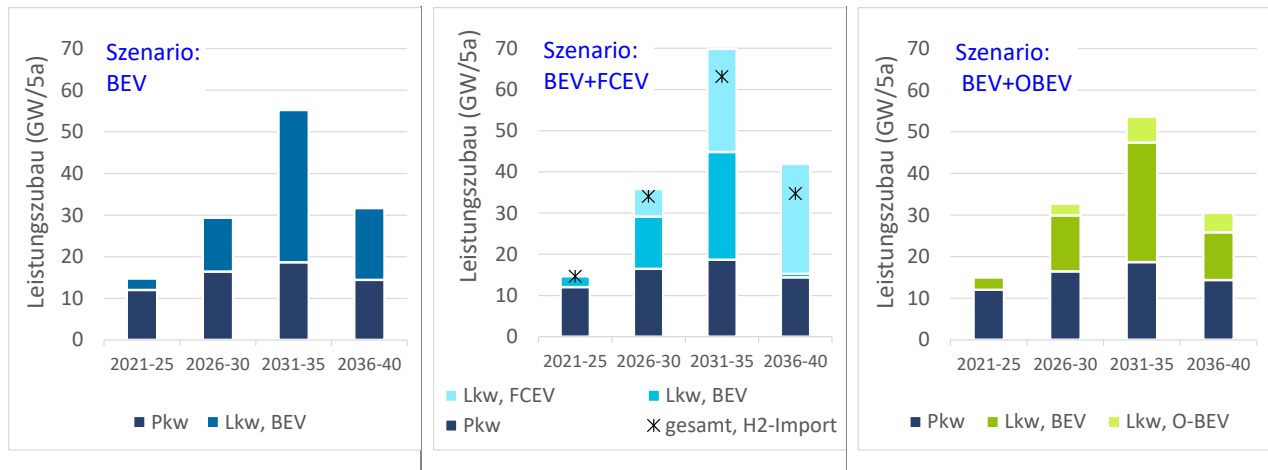
Abbildung 3-20: Zubau von EE-Anlagen in den unterschiedlichen Szenarien – Aufteilung in PV und Wind, kumuliert über 5-Jahres-Intervalle



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 3-21 zeigt den Zubau für die Nachfrage aus dem Verkehrssektor bezogen auf die unterschiedlichen Fahrzeugkategorien. Entsprechend ihres Anteils am Endenergieverbrauch (vgl. Kap. 3.5.1) zeigen sich trotz vergleichsweise geringer Fahrzeugzahlen hohe Anteile für den Güterverkehr.

Abbildung 3-21: Zubau von EE-Anlagen in den unterschiedlichen Szenarien – Aufteilung nach Fahrzeugtyp, kumuliert über 5-Jahres-Intervalle



Quelle: Eigene Berechnungen

Aus dem in Abbildung 3-20 dargestellten Kapazitätszubau ergibt sich unter Berücksichtigung der Materialintensität der einzelnen Technologien (s. Kapitel 2.4.2) die Nachfrage nach Rohstoffen. Bei Windkraftanlagen liegt der Bedarf für Leichte Seltene Erden abhängig vom Szenario im Mittel bei ca. 240-300 t/a, für Schwere Seltene Erden im Mittel bei ca. 28-35 t/a. Das entspricht ca. 25 % bzw. 15 % der mittleren jährlichen Nachfrage für Elektromotoren (vgl. Abbildung 3-16).¹² Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den Windkraftanlagen um Infrastrukturkomponenten handelt, bei denen im Vergleich zu den Fahrzeugen mit höheren Lebensdauern zu rechnen ist. Aufgrund der eingesetzten Technologien ist der spezifische Bedarf an Seltenen Erden bei den Offshore-Windkraftanlagen deutlich höher als bei den Onshore-Windkraftanlagen (vgl. Kap. 2.4.2). Dies führt dazu, dass trotz des geringeren Zubaus an Offshore-Windkraft insgesamt die gleiche Nachfrage nach Seltenen Erden wie durch Onshore-Windkraftanlagen entsteht.

Der Kupferbedarf für Windkraft- und PV-Anlagen wird im folgenden Kapitel zusammen mit dem Kupferbedarf für die Energieversorgungsinfrastrukturen und die Fahrzeuge dargestellt. Für den Bedarf an weiteren Metallen für PV-Anlagen wird auf die Ausführungen in [SKN 2023] verwiesen.

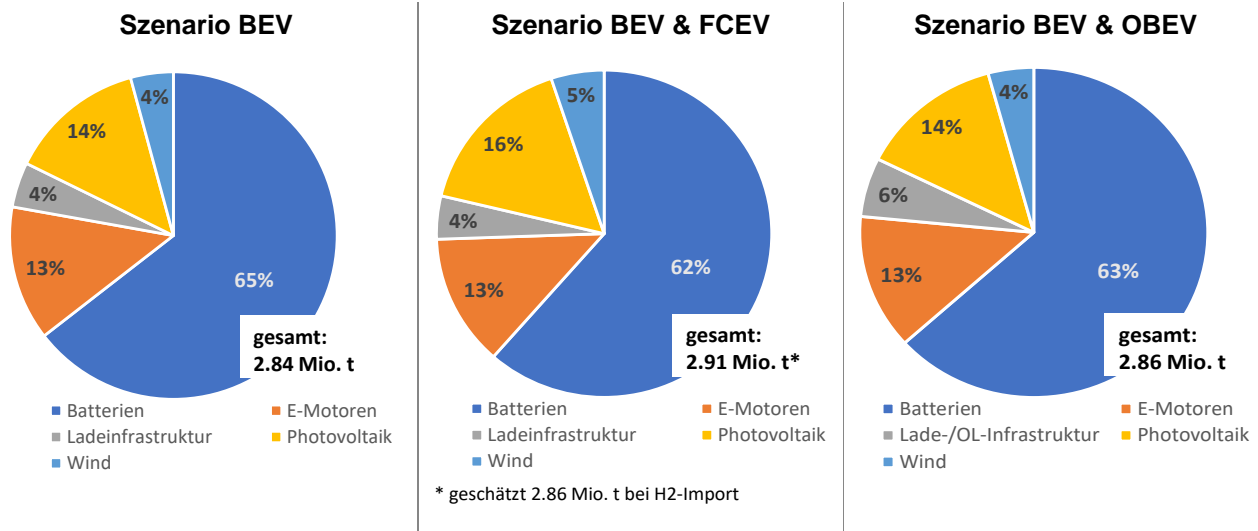
3.5.3 Kupferbedarf für Fahrzeuge und Energie-Infrastrukturen

Abbildung 3-22 zeigt den Kupferbedarf des Hochlaufes der Elektromobilität kumuliert über die Jahre 2021-2040. Dieser enthält das Kupfer für die Energieversorgungsinfrastrukturen (Ladepunkte, Umspannwerke, in Szenario „BEV+O-BEV“ zzgl. Oberleitungen und Unterwerke), die vorgelagerte EE-Stromerzeugung (s. Kap. 3.5.2) sowie für Antriebsbatterien und -motoren der Fahrzeuge (s. Kap.

¹² Bezogen auf die gesamte Nachfrage von 2021-2040 liegen die Mengen für die Windkraftanlagen bezogen auf die Mengen für Elektromotoren größenordnungsmäßig bei 18 % für die Leichten Seltenen Erden und 10 % für die Schwere Seltenen Erden.

3.2 und 3.3). Insgesamt liegt er bei 2,8-3 Mio. Tonnen, ohne eine mögliche Rückgewinnung, insbesondere aus Fahrzeugkomponenten, zu berücksichtigen.

Abbildung 3-22: Kupferbedarf für Energie-Infrastrukturen und Fahrzeuge – kumuliert (2021-2040)



OL: Oberleitungssystem

Quelle: Eigene Berechnungen

Weiterhin wird Kupfer für den Ausbau des Stromnetzes im Rahmen der Energiewende benötigt. Hierfür wurde für die Jahre 2021-2040 ein kumulierter Bedarf von 0,3 Mio. t geschätzt,¹³ wovon wiederum ein Teil der Elektrifizierung des Straßenverkehrs zuzuschreiben ist. Im Vergleich liegt dazu liegt der aktuelle Verbrauch an Raffinade-Kupfer in Deutschland bei ca. 1,1 Tonnen jährlich [BGR 2021].

In allen Szenarien wird die weitaus größte Menge des Kupfers für Batterien und E-Motoren eingesetzt. Wie in den Kapiteln 3.2 und 3.3 dargestellt, steigt der Bedarf während des Hochlaufes bis 2035 und bleibt danach bei ungefähr konstanten Fahrzeugzahlen bis 2040 auf konstantem Niveau. Die Kupfermengen in abgemeldeten Fahrzeuge nehmen über die Jahre zu und liegen im Mittel bei ca. 17 % der Neuzulassungen. Aus dem Anteil der verschrotteten Fahrzeuge¹⁴ können entsprechende Mengen zurückgewonnen werden.

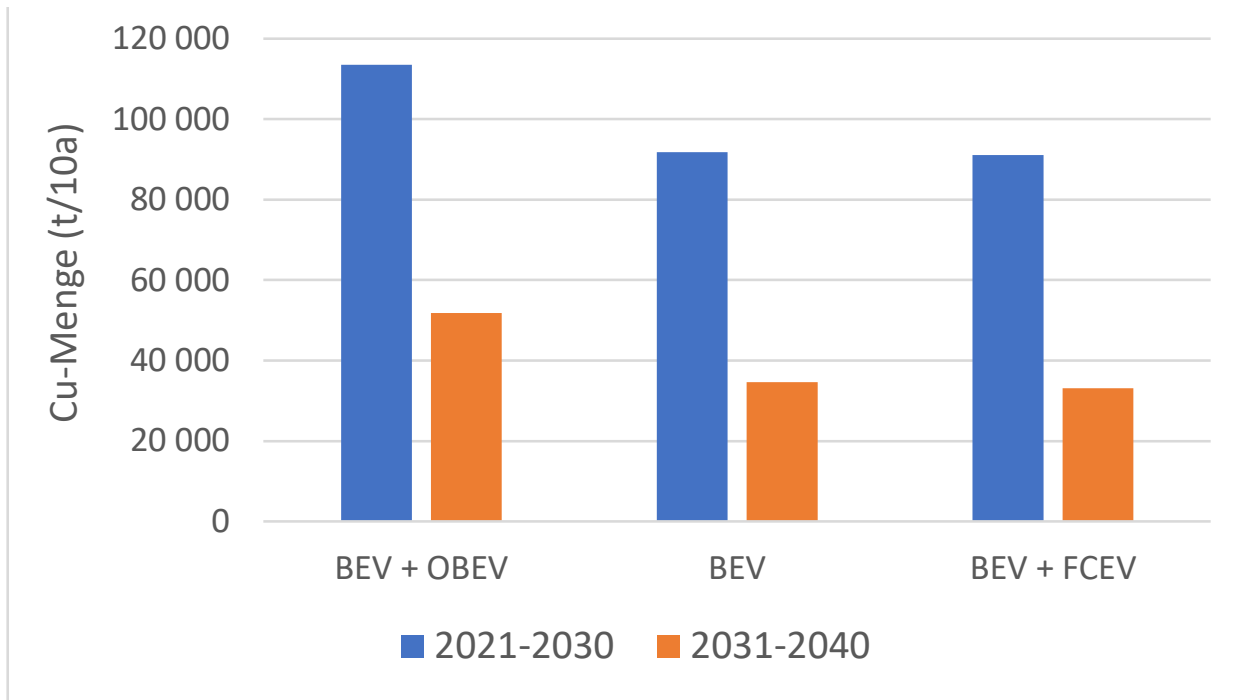
Demgegenüber ist der Kupferbedarf für die Energieversorgungsinfrastrukturen im laufenden Jahrzehnt deutlich höher als nach 2030 (s. Abbildung 3-23). In allen Szenarien wird er bei weitem dominiert durch die Ladepunkte für Pkw.¹⁵

¹³ Eigene Datenzusammenstellung des Öko-Instituts auf Basis persönlicher Mitteilungen von Fachakteuren involvierter Unternehmen.

¹⁴ Aktuell wird nach Angaben des UBA der Großteil der in Deutschland endgültig stillgelegten Pkw und LNF exportiert (<https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib#verbleib-von-endgultig-ausser-betrieb-gesetzten-fahrzeugen>; letzter Zugriff: 13.09.2023).

¹⁵ In „BEV“ und „BEV+FCEV“ liegt der Kupferbedarf für Pkw-Ladepunkte bis 2030 bei > 90 % des Gesamtbedarfes, zwischen 2031-2040 bei 75 % bzw. 80 %. In „BEV+O-BEV“ bis 2030 bei 68 % des Gesamtbedarfes, zwischen 2031-2040 bei 80 %.

Abbildung 3-23: Kupferbedarf für Ladeinfrastruktur, Oberleitungssysteme und zugehörige Umspannwerke in den kommenden Jahrzehnten



Quelle: Eigene Berechnungen

Im Hinblick auf die erneuerbare Stromerzeugung liegt der Hauptzubau und damit Rohstoffbedarf in den Jahren nach 2030, was v. a. durch den etwas späteren Hochlauf der elektrischen Lkw begründet ist. Hier ist insbesondere der Kupferbedarf für die Photovoltaikanlagen relevant. Im Gegensatz zu den Fahrzeugen ist bzgl. der Infrastrukturen mit höheren Lebensdauern zu rechnen, so dass Mengen aus Rückbau/Ersatz erst später anfallen.

3.6 Gesamtbewertung Rohstoffnachfrage der Szenarien

In einer Gesamtbewertung der Rohstoffbedarfe für die drei Szenarien „BEV“, „BEV+FCEV“ und „BEV+O-BEV“ kann zunächst festgehalten werden, dass die Gesamtunterschiede zwischen den drei Szenarien als gering eingestuft werden können. Dies erklärt sich aus dem Umstand, dass auf den Teilbereich Pkw für die strategischen Fahrzeugkomponenten Batterien und Elektromotoren der Hauptanteil der Komponenten- und Rohstoffnachfrage entfällt. Da die drei Szenarien sich nur bei den schweren Straßenfahrzeugen für den Güterverkehr bei dem Mix der Antriebssysteme unterscheiden, ist dies eine logische Konsequenz.

Mit dem steilen Hochlauf der Elektromobilität ist in erster Linie ein signifikanter Nachfrageanstieg für Lithium-Ionen-Batterien und Elektromotoren verbunden. Die jährliche Nachfrage nach Batteriekapazitäten steigt im „BEV“-Szenario ausgehend vom Jahr 2020 bis 2030 um den Faktor 14 und bis 2040 um den Faktor 18 im Vergleich zu 2020. Eine ähnliche Entwicklung kann für die Elektromotoren festgestellt werden. So wird sich der Bedarf nach Elektromotorenleistung für Antriebsmotoren für Pkw und Lkw ausgehend von 2020 bis 2035 ungefähr um den Faktor zehn erhöhen.

Die Antriebsbatterien für Elektrofahrzeuge werden auf absehbare Zeit Lithium-Ionen-Batterien sein. Der Zeitpunkt einer Marktreife und das Marktpotenzial möglicher Alternativen wie Natrium-Ionen-

Batterien oder Feststoffbatterien kann im Moment nicht belastbar eingeschätzt und kann entsprechend nicht seriös in Szenarien, insbesondere für den anspruchsvollen Fahrzeugsektor in Deutschland, berücksichtigt werden.¹⁶ Allerdings zeigen sich in jüngster Zeit innerhalb der Familie der Lithium-Ionen-Batterien wichtige Innovationen wie kobalt- und manganarme NMC-Batterien oder nickel-, mangan- und kobaltfreie LFP-Batterien im Markt, die den Bedarf an den einzelnen Schlüsselrohstoffen mittelfristig deutlich beeinflussen werden.

Von allen Schlüsselrohstoffen bei den Lithium-Ionen-Batterien ist in den letzten Jahren Lithium selbst besonders in den Fokus gerückt. Die ausreichende Versorgung Europas mit Lithium bis 2030 wird vor dem erwarteten Nachfrageanstieg als sehr angespannt eingeschätzt [Al Barazi 2022]. In den Szenarien in dieser Studie wächst allein für die deutschen Fahrzeugzulassungen der Lithiumbedarf von gut 1.000 t jährlich im Jahr 2020 über 20.000 t im Jahr 2030 auf rund 25.000 t im Jahr 2035 und verbleibt dann auf einem ähnlich hohen Niveau.

Einen starken Bedarfsanstieg zeigen auch die anderen Schlüsselrohstoffe der Lithium-Ionen-Batterien wie Nickel (von knapp 8.000 t im Jahr 2020 auf fast 110.000 t im Jahr 2035), Graphit (von rund 10.000 t 2020 auf rund 240.000 t im Jahr 2035) und Kupfer (von weniger als 10.000 t 2020 auf mehr als 130.000 t im Jahr 2035). Auch die Nachfrage nach Mangan und Kobalt steigt mittelfristig deutlich an: von jeweils rund 2.000 Tonnen im Jahr 2020 auf rund 22.500 Tonnen im Jahr 2035. Im Gegensatz zu den anderen Schlüsselrohstoffen sinkt im Falle von Kobalt und Mangan die Nachfrage bis 2040 auf bereits wieder unter 18.000 Tonnen im Jahr. Hier wirken sich die zunehmenden Marktanteile an kobalt- und manganarmen bzw. kobalt- und manganfreien Kathodenmaterialien entsprechend aus. In Abschnitt 4 werden die Konsequenzen auf der Anbieterseite der Wertschöpfungsketten auf die massiven Nachfragezuwächse bei Lithium-Ionen-Batterien diskutiert. Hier wird auch eingehend auf die mittel- und langfristige Bedeutung von Recyclingpotenzialen aus End-of-Life-Batterien für die zukünftige Versorgung der Märkte in Europa eingegangen.

Bei den Elektromotoren für den Antrieb der E-Fahrzeuge ist das zentrale Thema der deutliche Anstieg der Nachfrage nach Permanentmagneten (Neodym-Eisen-Bor-Magneten) und damit verbunden der signifikante Nachfrageanstieg nach Leichten Seltenen Erden (Neodym und Praseodym) sowie Schweren Seltenen Erden (Dysprosium und Terbium). So verzehnfacht sich der Bedarf an Permanentmagneten für Elektromotoren ausgehend vom Jahr 2020 auf rund 5.500 Tonnen jährlich im Jahr 2035. Der Bedarf an Seltenen Erden insgesamt verzehnfacht sich dabei ebenfalls bis zum Jahr 2035 auf über 1.500 Tonnen jährlich. In Abschnitt 4 wird auf die daraus resultierenden Herausforderungen an die sehr relevante strategische Wertschöpfungskette der Neodym-Eisen-Bor-Magnete eingegangen.

Anders als bei den Schlüsselkomponenten Lithium-Ionen-Batterien und Elektromotoren stellt sich die Frage der Nachfrage- versus Angebotsentwicklung bei den Brennstoffzellen weit weniger gravierend. Zwar wäre ein Bedarfsanstieg für Brennstoffzellen aus dem Lkw-Sektor mit einem wachsenden Platinbedarf verbunden. Allerdings wird durch die wachsende Elektrifizierung der Antriebe für Straßenfahrzeuge und dem damit verbundenen Rückgang der Nachfrage nach Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor der Platinbedarf für Autoabgaskatalysatoren drastisch zurückgehen. Weiterhin trägt der nur moderate Anteil der Lkw mit Brennstoffzellenantrieb im entsprechenden Szenario potenziell zu einer Entspannung bei der zu erwartenden Platinnachfrage bei. Auf diese Zusammenhänge und das bemerkenswerte Recyclingpotenzial des wertvollen Edelmetalls Platin wird in Abschnitt 4 explizit eingegangen.

¹⁶ Vgl. hierzu auch [SKN 2023].

Im Rahmen dieser Studie wurden auch die Rohstoffbedarfe für die zur Elektrifizierung der Straßenfahrzeuge notwendigen zusätzlichen Energieversorgungsinfrastrukturen sowie Stromerzeugungsinfrastrukturen für Photovoltaik und Windkraft untersucht. Verglichen mit den steilen Bedarfsanstiegen für Lithium-Ionen-Batterien und Elektromotoren und den damit verbundenen Schlüsselkomponenten und Schlüsselrohstoffen, zeichnet sich hier nach den Szenarien die Entwicklung weniger signifikant ab.

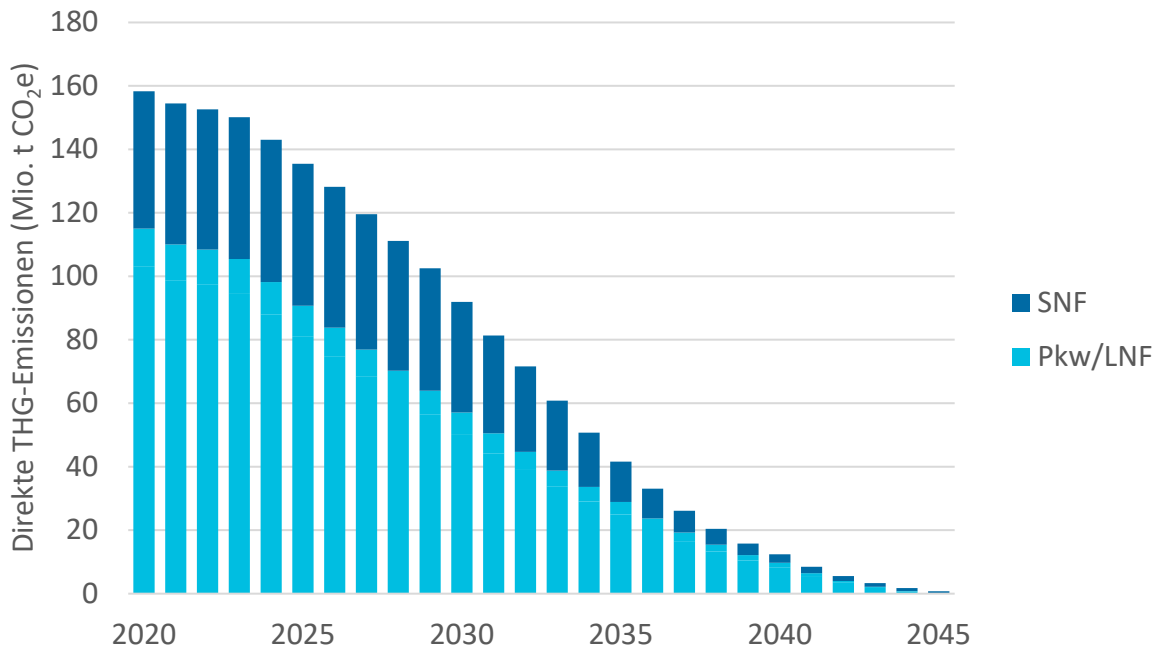
Kupfer ist ein Schlüsselrohstoff, der sowohl für Ladeinfrastrukturen und Oberleitungen als auch für PV- und Windkraftanlagen eine Rolle spielt. Allerdings zeigen die Szenarienergebnisse, dass auch für den Schlüsselrohstoff Kupfer insgesamt die Bedarfe für Lithium-Ionen-Batterien und Elektromotoren dominieren. So machen in allen drei untersuchten Szenarien diese beiden Fahrzeugkomponenten rund 75 % des kumulierten Kupferbedarfs von rund 2,5 Mio. Tonnen für den Zeitraum 2020 bis 2040 aus. Energieversorgungsinfrastrukturen sowie Stromerzeugungsinfrastrukturen spielen zwar eine gewisse Rolle – allerdings dominieren hier die Fahrzeugkomponenten, die im Gegensatz zu den langlebigen Infrastrukturen eine mittlere Lebensdauer aufweisen (vgl. Recyclingdiskussion zu Kupfer in Abschnitt 4).

Pro Jahr beträgt im Szenariozeitraum 2020 bis 2040 der durchschnittliche Kupferbedarf insgesamt rund 150.000 Tonnen. Dem steht allerdings bereits ein – ohne Elektrifizierung des Fahrzeugsektors – aktueller Verbrauch an Raffinadekupfer in Deutschland von rund 1,1 Mio. Tonnen jährlich [BGR 2021] gegenüber. Anders ausgedrückt ist der Sockelverbrauch Deutschlands an Kupfer bereits hoch. Die Antriebswende ist zwar mit einer relevanten Kupfernachfrage verbunden – allerdings stellt sich das Bedarfswachstum erheblich weniger signifikant dar im Vergleich z. B. zum Batterierohstoff Lithium. In Abschnitt 4 wird außerdem auf das sehr relevante Potenzial an Sekundärkupfer aus dem Recycling eingegangen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Nachfrage nach Schlüsselrohstoffen durch die Antriebswende in erster Linie durch die Elektrofahrzeuge selbst getrieben werden. Die notwendigen Infrastrukturen wie Ladeinfrastrukturen oder die zusätzliche Erzeugung von Erneuerbarer Energie spielen zwar für die Rohstoffnachfrage eine Rolle – aber mit deutlich weniger Signifikanz.

Abschließend soll hier nicht zuletzt auf die gewaltigen Ressourceneinsparungen hinsichtlich des Bedarfs fossiler Energieträger (in erster Linie Rohöl für Diesel- und Benzin-Kraftstoffe) und der damit verbundenen gewaltigen Reduzierungen der entsprechenden Treibhausgasemissionen hingewiesen werden. Diese Aspekte wurden bereits in einer vorangegangenen Studie [Betz et al. 2021a] im Detail analysiert. Bei Realisierung der Antriebswende im Straßenverkehrsbereich würden, unabhängig davon welches der drei hier gewählten Szenarien eintritt, in diesem Sektor bis 2045 Klimaneutralität und damit praktisch eine vollständige Abkehr vom Rohstoff Rohöl erreicht sein. Die Entwicklung der direkten Treibhausgas-Emissionen im Straßenverkehr ist für das BEV-Szenario in Abbildung 3-24 dargestellt. Wegen nur marginaler Unterschiede zu den beiden anderen Szenarien mit Antriebsmix im Schwerlastverkehr sind diese nicht zusätzlich dargestellt.

Abbildung 3-24: Direkte Treibhausgas-Emissionen von Pkw, leichten und schweren Nutzfahrzeugen im BEV-Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen

Hervorzuheben ist, dass der Beitrag der schweren Nutzfahrzeuge (SNF) zur Reduktion der Treibhausgasemissionen anteilig höher ist als der Bedarf der SNF an zusätzlicher Batteriekapazität für Antriebsbatterien etc. Anders ausgedrückt zahlt sich ein Hochlauf bei der Elektromobilität im Teilbereich SNF schnell mit deutlichen Minderungen beim Kraftstoffbedarf und Treibhausgasemissionen aus und erfordert dabei spezifisch weniger zusätzliche Batteriekapazität. Dies liegt an den besonders hohen jährlichen Fahrleistungen der SNF und deren – im Vergleich zu Pkw – hohem Dieserverbrauch je 100 km.

Eine Abkehr vom Rohstoff Rohöl bedeutet eine drastische Minderung der negativen Umwelt- und gesellschaftlichen Auswirkungen, die mit der Förderung von Rohöl in Ländern wie z. B. Russland, Libyen, Nigeria usw. verbunden sind. Damit würde Deutschland von unerwünschten und teuren Abhängigkeiten beim Bezug von Rohöl befreit sein. Dies ist gerade unter Berücksichtigung des Angriffskrieges von Russland gegen die Ukraine und die nachfolgenden Entwicklungen (Stopp des Rohölbezugs aus Russland) ein sehr wichtiges Ziel. Bis kurz vor Kriegsbeginn gegen die Ukraine im Februar 2022 war Russland der mit Abstand wichtigste Rohöllieferant für Deutschland [Betz et al. 2021a].

4 Bewertung der Hochlaufszzenarien in Bezug auf die Wertschöpfungsketten

Die Transformation weg von fossilen Energieträgern sorgt durch die stark wachsende Nachfrage nach strategischen Rohstoffen für Herausforderungen auf der Angebotsseite. Dabei muss der Blick jedoch von den Rohstoffen allein auf die Wertschöpfungskette insgesamt geweitet werden, da selbst im Fall von genügend zur Verfügung stehenden Rohstoffen auch weiter hinten gelagerte Schritte in der Wertschöpfungskette, wie z. B. die Prozessierung und Verarbeitung der Rohstoffe, Herausforderungen darstellen können.

Eine Kritikalität bestimmter Wertschöpfungsketten ergibt sich aus verschiedenen Aspekten [SKN 2023]:

- Ökonomische Bedeutung
- Versorgungsrisiken
- Zeit und Dynamik.

Je nach Rohstoff und Wertschöpfungskette sind unterschiedliche Aspekte relevanter. Die ökonomische Bedeutung ergibt sich aus der Mengenrelevanz und der fehlenden Substituierbarkeit und der daraus resultierenden strategischen Bedeutung. Das Versorgungsrisiko hängt vor allem vom Angebot im Vergleich zur Nachfrage ab. Darüber hinaus kommen jedoch auch Aspekte wie Marktkonzentration, Länderrisiko und die Nachhaltigkeit hinzu. Im Rahmen der Zeit und Dynamik können ein schneller Hochlauf und ein damit verbundener Anstieg der Nachfrage die zuvor genannten Aspekte verschärfen. Insbesondere im Markthochlauf sind Angebot und Nachfrage schwierig zu synchronisieren. Selbst wenn an sich genug Rohstoffe bzw. Möglichkeiten zur Produktion gegeben sind, kann es in einem solchen Szenario immer wieder zu temporären Knappheiten kommen. Diese beinhalten jedoch keine absoluten Knappheiten, gehen jedoch mit Preiserhöhungen für die Rohstoffe einher.

Je nach Dauer des höheren Preisniveaus werden Investoren dies als Investitionsgelegenheit sehen und in diesen Bereich investieren. Diese signifikanten Investitionen sind zeitnah notwendig, um die Ausweitung der gesamten Wertschöpfungskette, insbesondere die Rohstoffgewinnung und -verarbeitung, zu ermöglichen. Da dies je nach Rohstoff und besonders nach Schritt in der Wertschöpfungskette erst mit mehreren Jahren Verzögerungen zu Ergebnissen führt, ist die Rolle der Politik und der Industrie am Ende der Wertschöpfungskette derartige Knappheiten für ihre eigenen Ziele frühzeitig zu erkennen und bei Bedarf Maßnahmen zu ergreifen. Für bestimmte Rohstoffe in der Kette, sind auch Verschiebungen bzw. Substitutionen innerhalb der Technologien möglich, zum Beispiel bei Lithium-Ionen-Batterien von kobalthaltigen zu kobaltfreien Kathodenmaterialien. Dies ist zwar mit einigen Herausforderungen verbunden, kann aber kurzfristiger zu Entlastung führen. Dies ist jedoch nur bei bestimmten Rohstoffen möglich. Knappheiten zum Beispiel bei Lithium werden dadurch nicht vermieden werden können, da alle Traktionsbatterien mittelfristig darauf angewiesen sind. Insgesamt muss ein rasanter Hochlauf bei der Nachfrage von Batterien durch Elektroautos auch mit einem angemessenen Hochlauf auf der Angebotsseite über die gesamte Wertschöpfungskette begleitet werden.

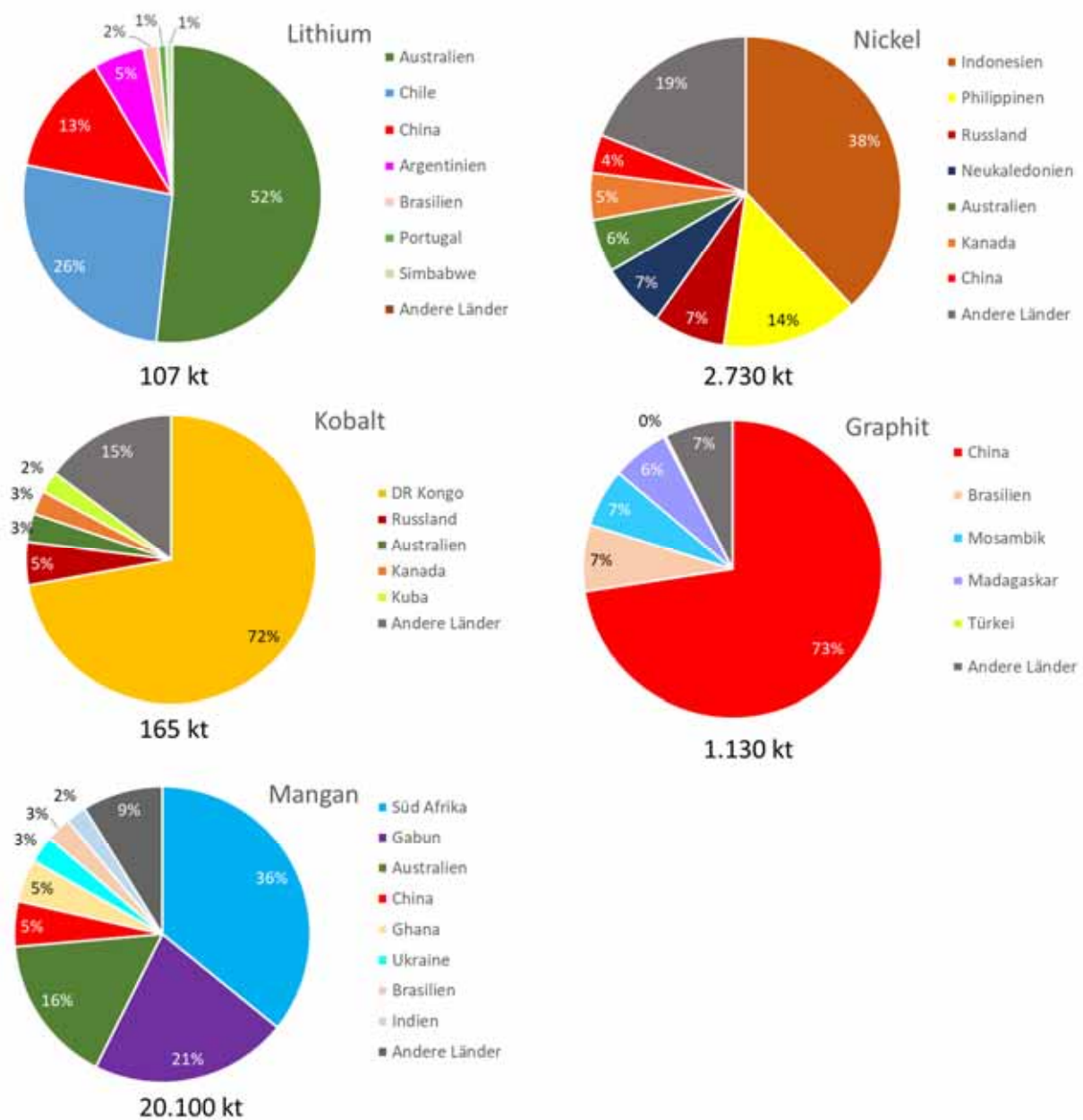
4.1 Wertschöpfungskette Lithium-Ionen-Batterien

Die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien benötigt eine große Zahl strategischer Rohstoffe, welche in verschiedenen Teilen der Welt gefördert werden. Die wichtigsten davon sind Lithium, Nickel, Kobalt, Graphit und Mangan. Die aktuelle Minenproduktion dieser Rohstoffe nach Ländern ist in

Abbildung 4-1 dargestellt. Für einige Rohstoffe ergibt sich aus dieser Übersicht eine starke Konzentration auf bestimmte Länder. Gerade für Kobalt und natürlichem Graphit stammt die Produktion zu über 70 % aus einem Land. Auch bei den anderen Rohstoffen gibt es Länder, die eine große Markt-macht auf sich vereinen. Jedoch ist diese weniger stark ausgeprägt.

Gleichzeitig sind die Mengen der produzierten Rohstoffe sehr unterschiedlich, vor allem abhängig von der Nachfrage aus anderen Bereichen. Während im Jahr 2021 z. B. gerade einmal 107 kt Lithium weltweit gefördert wurden, welches vor allem für Batteriezellen benötigt wird, waren es etwa 20.100 kt Mangan, welches vor allem in der Stahlindustrie eine große Rolle spielt.

Abbildung 4-1: Förderung von Lithium, Nickel, Kobalt, Graphit und Mangan in 2021



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [USGS 2023]. Die Massen geben den jeweiligen Rohstoffgehalt an.

In diesem Kontext sind starke Schübe in der Nachfrage je nach Rohstoff unterschiedlich zu bewerten. Jedoch liegt gerade bei Mangan der kritische Schritt der Wertschöpfungskette in der Prozessierung zu hochreinem Mangansulfat, welcher für die Stahlindustrie nicht notwendig, für die weitere Verarbeitung zu manganhaltigen Lithium-Ionen-Batterien jedoch essenziell ist. Dieser fand im Jahr 2022 zu ca. 95 % in China statt [Benchmark Minerals 2022].

Auch bei anderen Rohstoffen für Lithium-Ionen-Batterien kommt es in den weiteren Schritten der Wertschöpfungskette zu Konzentrationen der Produktion in China. Im Jahr 2022 fand nach Benchmark Minerals neben Mangan auch über die Hälfte der Produktion an hochreinem Nickel, Kobalt und Graphit in China statt (s. Abbildung 4-2).

Bei den Kathoden- und Anodenmaterialien ist die Dominanz Chinas sogar noch größer. Besonders bei LFP-Kathodenmaterial und der daraus entstehenden Zellen ist China absolut dominierend. Im Jahr 2023 werden Prognosen nach nur 0,3 % der LFP-Zellen außerhalb Chinas produziert [Benchmark Minerals 2023].

Abbildung 4-2: Wertschöpfungsstufen Lithium-Ionen-Batterien: Anteile VR China



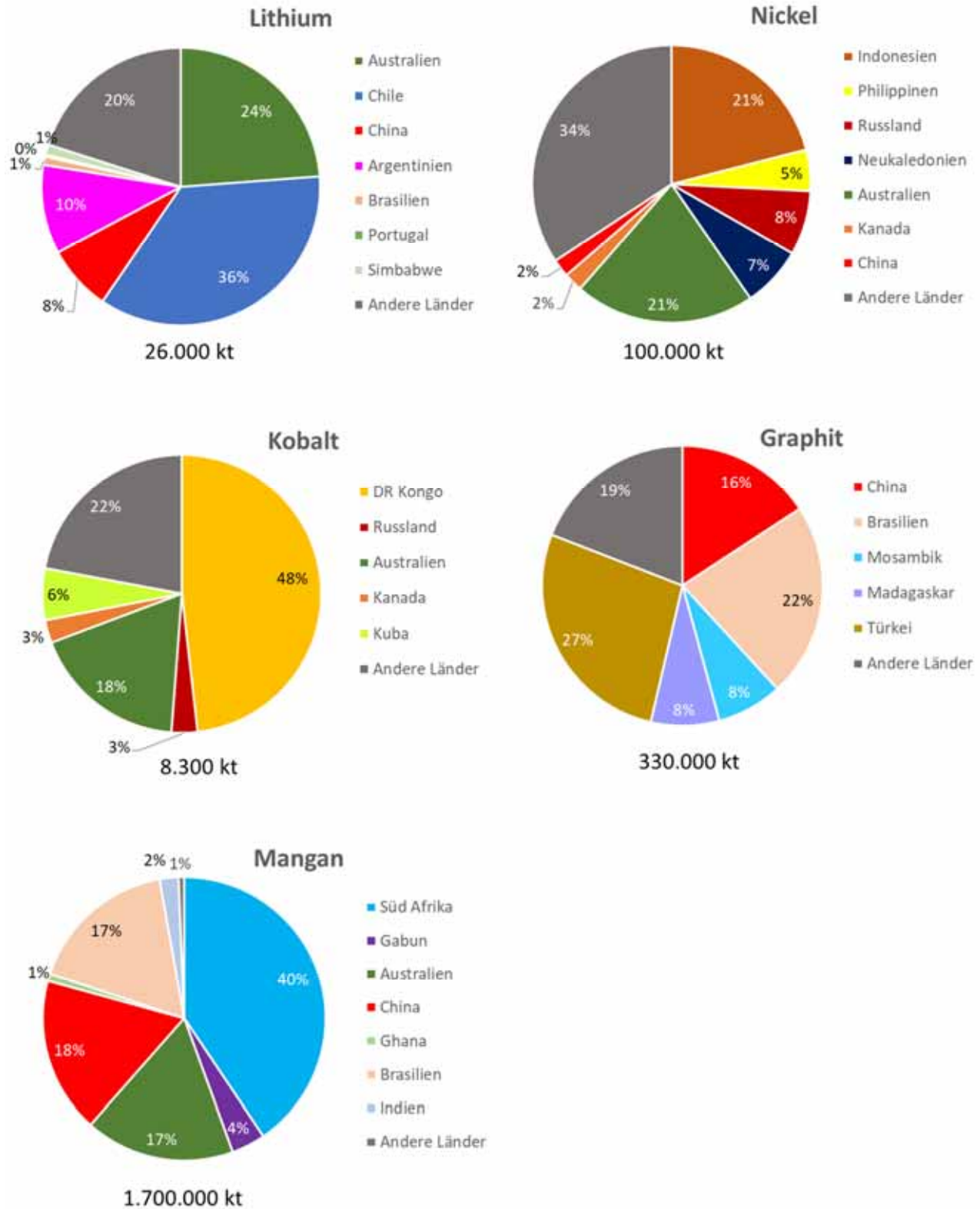
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [USGS 2023], [Benchmark Minerals 2022]

Zum Vergleich zu der jährlichen Produktion sind in Abbildung 4-3 die Reserven der einzelnen Rohstoffe dargestellt. Die Reihenfolge der Länder ist dieselbe wie bei der Produktion, was direkt die Unterschiede der Reihenfolge und Dominanz verbildlicht. Interessant sind besonders die großen Reserven an Lithium in Chile und Argentinien, die Nickel-, Kobalt- und Manganreserven in Australien und die Graphitreserven in der Türkei, die alle ein großes Potenzial für weitere Produktion erkennen lassen. Wichtig ist dabei zu verstehen, dass ein Vorkommen eines Rohstoffs nur als Reserve gezählt wird, wenn es vollständig evaluiert und als wirtschaftlich abbaubar gewertet wird. Da sich Wirtschaftlichkeit abhängig vom Markt sehr stark ändern kann, sind Reserven keine statische Größe. Darüber hinaus können Reserven durch verstärkte Exploration entdeckt werden und sind abhängig von ökologischen und ökonomischen Gegebenheiten. Besonders deutlich wird dies, wenn man den Verlauf der Lithiumreserven über die Zeit betrachtet. Diese beliefen sich für Lithium im Jahr 2010 auf gerade mal 9.900 kt und haben sie sich bis 2023 auf 26.000 kt mehr als 2,5-facht [USGS 2010], [USGS 2023].

Insgesamt wird für alle fünf hier betrachteten Rohstoffe deutlich, dass auf globaler Ebene genug Reserven vorhanden sind und dies nicht dem Hochlauf der Elektromobilität für Pkw und Lkw im Weg steht. Dennoch kann es auf dem Weg dahin zu temporären Knappheiten kommen. Hier ist besonders Lithium zu nennen. Selbst mit den wachsenden Kapazitäten, u. a. in der EU, wird aufgrund

des sehr starken Hochlaufs von den meisten Studien mit einer temporären Verknappung gegen Mitte/Ende des jetzigen bzw. Anfang des nächsten Jahrzehnts gerechnet [Al Barazi 2022, SKN 2023].

Abbildung 4-3: Reserven von Lithium, Nickel, Kobalt, Graphit und Mangan in 2023



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [USGS 2023]. Die Massen geben den jeweiligen Rohstoffgehalt an.

Darüber hinaus ist der Abbau selbst mit großen ökologischen und sozialen Herausforderungen verbunden. Diese wurden in den letzten Jahren in vorausgegangenen Studien, unter anderem vom Öko-Institut (s. [Betz et al. 2021a], [Dolega et al. 2020], [Betz et al. 2021b]), ausführlich adressiert und werden deshalb hier nur angerissen. Allgemein gesehen ist so gut wie jede Gewinnung von Rohstoffen mit Eingriffen in die Natur verbunden. Diese können jedoch mit den nötigen Maßnahmen minimiert bzw. revidiert werden. Dabei hängt sehr viel an den jeweils ausgewählten Reserven und den technischen Möglichkeiten der auszuführenden Bergbauunternehmen. Diesen kann über gesetzliche Regelungen und freiwillige Standards ein ambitionierter Rahmen vorgegeben werden, was jedoch entsprechende politische Strukturen erfordert.

Ein großer Vorteil der meisten Rohstoffe für Batterien, auch gegenüber den fossilen Brennstoffen, ist jedoch die Möglichkeit sie zu recyceln. In Kapitel 3.2 ist daher zusätzlich zum Bedarf der Rohstoffe auch das jeweilige Potenzial für Recycling dargestellt, was sich aus den Abmeldungen der Fahrzeuge nach der angenommenen Lebenszeit in Deutschland ergibt. Dabei wird direkt offensichtlich, dass signifikante Mengen an Batterien aus Altfahrzeugen erst ab 2030 zur Verfügung stehen werden. Die Zahl der Abmeldungen ist allerdings nicht direkt in die Menge an recyceltem Rohstoff umzurechnen, da in diesem Fall noch keine Exporte an Fahrzeugen in Länder außerhalb der EU bzw. Verluste während des Recyclings angerechnet sind. Darüber hinaus wird ein großer Teil von Altfahrzeugen (30 bis 40 %) zurzeit innerhalb der EU nicht statistisch erfasst [Baron et al 2023]. Dies ist unter anderem darin begründet, dass sie nicht immer von autorisierten Behandlungsanlagen (Authorised Treatment Facilities, ATF) behandelt werden. Elektroautos sind noch eine vergleichsweise neue Technologie, weshalb nicht geklärt ist, wie sich die Ströme an Altfahrzeugen entwickeln werden und inwiefern die Batterien tatsächlich innerhalb Deutschlands bzw. der EU ins Recycling gehen.

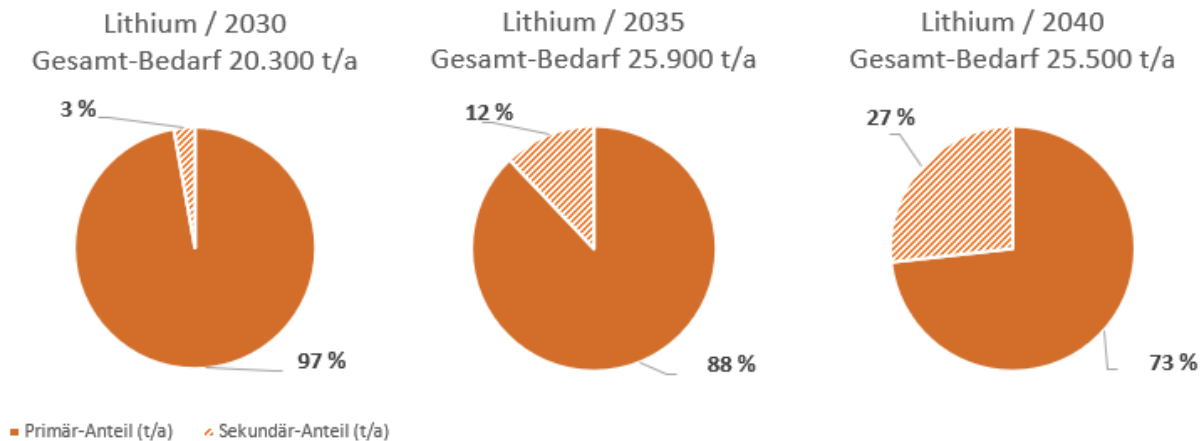
Sobald Lithium-Ionen-Batterien allerdings innerhalb der EU anfallen, müssen sie vom Gesetz her recycelt werden. Die erst kürzlich von der EU endgültig verabschiedete neue Batterieverordnung [BatReg 2023] gibt hier klar Recyclingeffizienzen für die gesamte Batterie¹⁷ und zusätzlich Rückgewinnungsquoten für bestimmte Metalle (Kobalt, Kupfer, Lithium und Nickel) vor, die sich mit der Zeit noch erhöhen. Ab 2028 müssen Kobalt, Kupfer und Nickel zu 90 % und Lithium zu 50 % aus Batterien zurückgewonnen werden. Ab 2032 sind es 95 % für Kobalt, Kupfer und Nickel und 80 % für Lithium. Die Berechnungsgrundlage muss dafür jedoch noch in einem delegierten Rechtsakt der Europäischen Kommission etabliert werden.

Wenn man also davon ausgeht, dass von den abgemeldeten Fahrzeugen 80 % innerhalb der EU verbleiben und recycelt werden¹⁸ und die vorgeschriebenen Quoten annimmt, stehen 2030 dem Gesamtbedarf von 20.300 t/a Lithium aus dem Recycling erst knapp 600 t/a Lithium (Sekundärmaterial) gegenüber, das entspricht 2,5 % des Bedarfs (s. Abbildung 4-4). Anschließend steigt der Anteil an recyceltem Lithium jedoch kontinuierlich und rasant (27 % in 2040, 41 % in 2045).

¹⁷ Ab 2026 muss für Lithium-Ionen-Batterien 65 % des Durchschnittsgewichts der Batterie, ab 2031 70 % recycelt werden. Die Berechnungsgrundlage muss dafür in einem delegierten Rechtsakt der Europäischen Kommission etabliert werden.

¹⁸ Vgl. etwa <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altfahrzeugverwertung-fahrzeugverbleib#verbleib-von-endgueltig-ausser-betrieb-gesetzten-fahrzeugen>

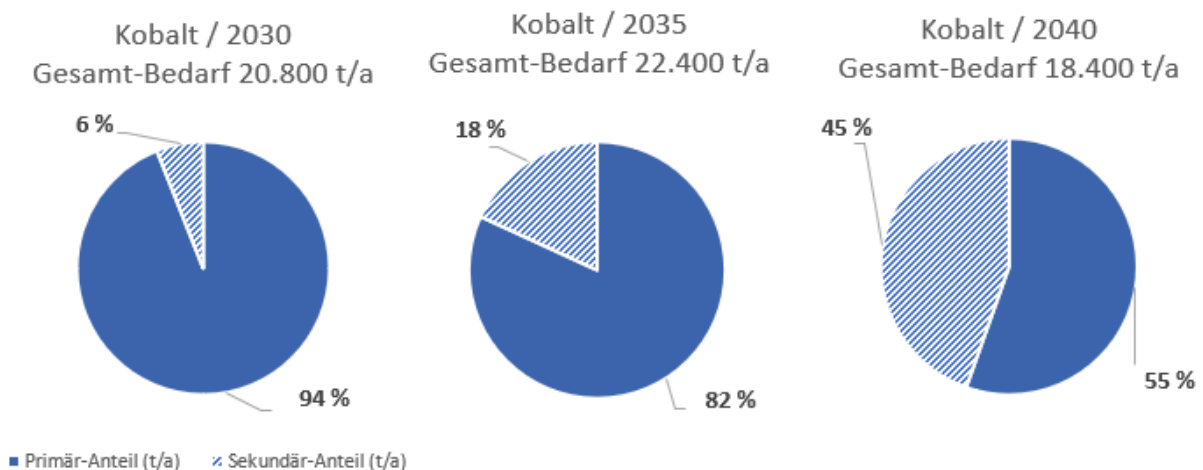
Abbildung 4-4: Bedarf an Lithium und Potenzial an Rezyklat aus dem Mobilitätssektor



Quelle: Eigene Berechnung Öko-Institut e.V.

Für Kobalt ist das Recyclingpotenzial noch größer, da der Bedarf im Szenario aufgrund der technologischen Entwicklung schneller sinkt und die Rückgewinnungsquoten noch höher sind. 2030 stehen einem Bedarf von 20.800 t/a Kobalt bereits 1.200 t/a recyceltes Kobalt gegenüber, was 6 % des Bedarfs entspricht. 2035 wären es dem Szenario nach schon ca. 4.000 t/a (18 %), 2040 in etwa 8.200 t/a (45 %), wie in Abbildung 4-5 dargestellt, und 2045 ca. 11.800 t/a (80 % des Bedarfs) recyceltes Kobalt.

Abbildung 4-5: Bedarf an Kobalt und Potenzial an Rezyklat aus dem Mobilitätssektor



Quelle: Eigene Berechnung Öko-Institut e.V.

Dies zeigt das wachsende Potenzial, welches Recycling beim Angebot an Rohstoffen in den kommenden Jahrzehnten spielen kann, sobald der Markt etwas gesättigt ist.

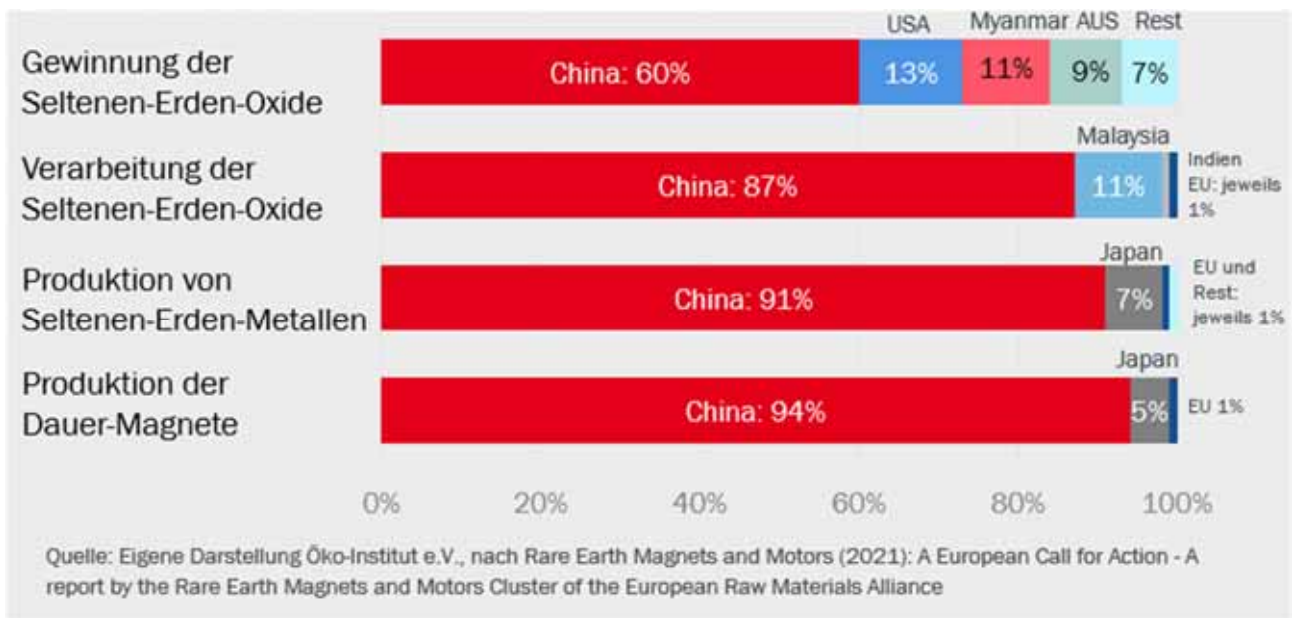
Die im Jahr 2023 verabschiedete EU-Batterieverordnung fordert ab 2031 für bestimmte Batterien, u. a. Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen, zusätzlich einen Mindestgehalt an Rezyklat für Lithium, Nickel (jeweils 6 %) und Kobalt (16 %), die ab 2036 verschärft werden sollen. Sie geht dabei

noch über die hier berechneten Werte an zur Verfügung stehendem sekundärem Material hinaus.¹⁹ Allerdings darf dafür auch recyceltes Material aus anderen Batterien, für die zunächst keine Quoten gelten, wie Batterien aus Kleingeräten, verwendet werden. Zusätzlich kann auch recyceltes Material aus Produktionsschrotten der Batterieproduktion verwendet werden, um die Quoten zu erfüllen.

4.2 Wertschöpfungskette Elektromotoren

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten aufgeführt, ist für die wichtige Komponente Elektromotor der Fokus in erster Linie auf die Wertschöpfungskette der Permanentmagnete (Neodym-Eisen-Bor-Magnete) zu legen. In der nachfolgenden Abbildung sind in einem vereinfachten Schema die wesentlichen Stufen der Wertschöpfungskette sowie die aktuellen Marktanteile bezogen auf Länder dargestellt [ERMA 2021].

Abbildung 4-6: Wertschöpfungsstufen Permanentmagnete: Anteil nach Ländern



Aus der Abbildung geht hervor, dass die VR China bei allen Stufen der Wertschöpfungskette eine dominante bis sehr dominante Rolle einnimmt. Dies gilt vor allem für die Stufen Verarbeitung der Seltenen Erden, die Produktion von Seltenen-Erden-Metallen (bzw. entsprechenden Legierungen) und die Produktion der Permanentmagnete (Neodym-Eisen-Bor-Magnete) selbst. Diese Wertschöpfungsstufen sind mit erheblichen technologischen Kompetenzen und personellen Kapazitäten in der VR China verbunden, die zurzeit so in keinem anderen Land weltweit vorzufinden sind [ERMA 2021, SKN 2023].

Eine Reihe von Ländern wie die USA, Kanada, Australien haben inzwischen die starken Abhängigkeiten vieler heimischer Branchen (Windkraftindustrie, Fahrzeugindustrie, Elektromotorenindustrie, Maschinenbau etc.) durch die Dominanz der VR China bei der Wertschöpfungskette für Permanentmagnete erkannt und versuchen ihrerseits „mine-to-magnet“-Wertschöpfungsketten im eigenen Land bzw. in Kooperation mit befreundeten Ländern aufzubauen (vgl. z. B. [Innovation News 2023], [Moreno 2023], [Hewett 2023]). Auch die EU geht mit etwas Verspätung diesen Weg an und hat

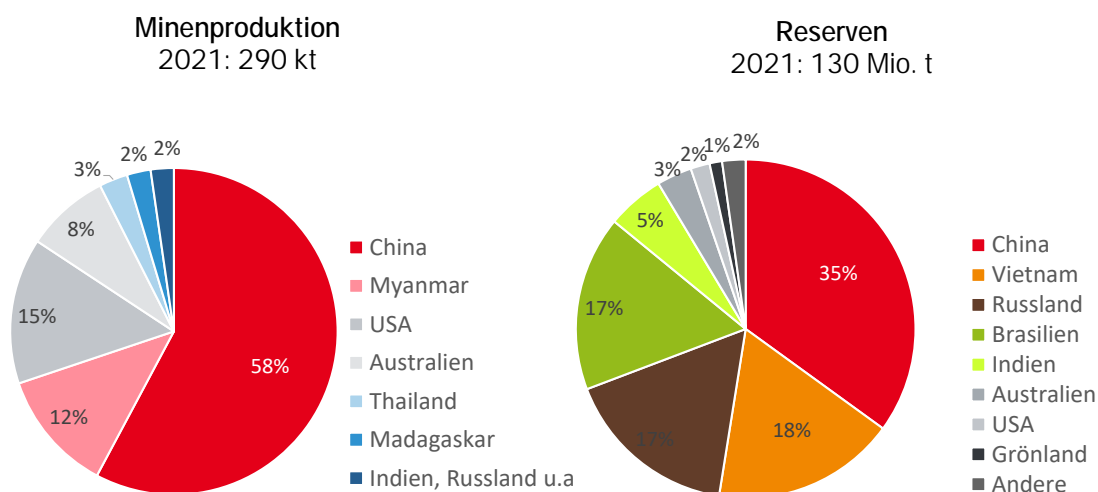
¹⁹ 2031: 16 % Kobalt, 6 % Lithium, 6 % Nickel; 2036: 26 % Kobalt, 12 % Lithium; 15 % Nickel

gerade mit Mitteln des „Just Transition“ Fonds den Bau einer neuen Magnetfabrik in Estland inkl. wichtiger Vorstufen angestoßen [Neomaterials 2023]. Weiterhin wird im Entwurf der Europäischen Kommission zum Critical Raw Materials Act (CRMA) explizit und ausführlich auf Seltene Erden und Permanentmagnete eingegangen [CRMA 2023].

In der nachfolgenden Abbildung sind für das Jahr 2021 die Anteile der Länder an der Minenförderung von Seltenen Erden (alle entsprechenden Elemente zusammen: 290.000 Tonnen) aufgeführt. Die VR China liegt weiterhin auf Platz 1 mit 58 % Anteil. Danach folgen die USA mit 15 %, Myanmar mit 12 % und Australien mit 8 % Anteil. Zehn Jahre zuvor – 2011 – hatte die VR China jedoch noch einen Anteil von 95 % gehabt – bei einer globalen Fördermenge von damals rund 110.000 Tonnen [USGS 2013].

Die Verteilung der aktuell bekannten Reserven (rechtes Tortendiagramm in der Abbildung: in Summe 130 Mio. Tonnen) an Seltenen Erden zeigt eine noch stärkere Diversifizierung: so weisen u. a. Länder wie Vietnam mit 18 % oder Brasilien mit 17 % erhebliche Anteile und absolute Mengen an Reserven aus. Es lässt sich konstatieren, dass natürliche Vorkommen an Seltenen Erden in vielen Ländern in großen Mengen vorkommen. Weiterhin zeigen die Entwicklungen in den letzten Jahren, dass Förderanteile einzelner Länder sich durchaus über die Zeit deutlich verändern können. Eine weitere Diversifizierung der Minenproduktion ist daher wohl möglich.

Abbildung 4-7: Förderung und weltweite Reserven von Seltenen Erden 2021



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [USGS 2023]. Reserven ohne Myanmar

Bei der Bewertung der Angebotssituation bei der Minenförderung von Seltenen Erden ist allerdings zu unterstreichen, dass die Förderung der für hochwertige Permanentmagnete essenziellen Schweren Seltenen Erden Dysprosium und Terbium zurzeit ausschließlich in der VR China und in Myanmar erfolgt. Die Weiterverarbeitung dieser Schweren Seltenen Erden erfolgt gar zu 100 % in der VR China [SKN 2023]. Diese Monopolsituation stellt eine ernsthafte Herausforderung für diese Wertschöpfungskette dar. In Abschnitt 5 werden hierzu Empfehlungen zur Stärkung der Wertschöpfungskette formuliert.

In Abschnitt 3 wurden bereits die Potenziale für ein zukünftiges Recycling für Neodym-Eisen-Bor-Magnete bzw. die darin enthaltenen Seltenen Erden dargestellt. Das Potenzial wächst vor allem ab 2030 aus dann angemeldeten Fahrzeugen mit Elektromotoren stark an. Recycling von Permanentmagneten und Seltenen Erden befindet sich allerdings in Europa und auch weltweit noch weitgehend

in einer Forschungs- und Entwicklungsphase. Aufgrund der stark wachsenden Relevanz dieser strategisch bedeutsamen Wertschöpfungskette und der hohen Werthaltigkeit der Neodym-Eisen-Bor-Magnete, wird hier jedoch ein wichtiges neues Feld der Recyclingwirtschaft erwartet [van Nielen 2023].

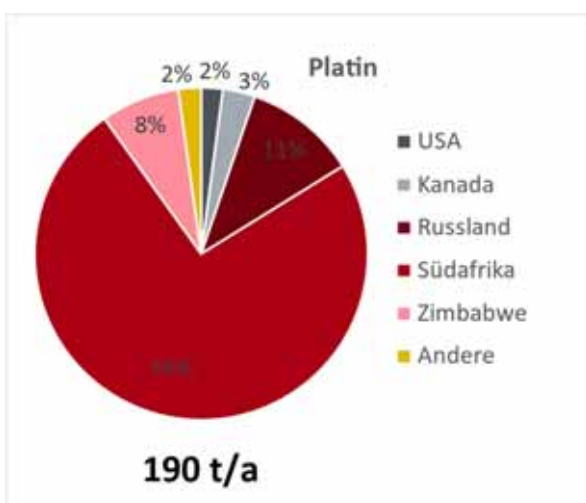
Die Attraktivität der Neodym-Eisen-Bor-Magnete als Ausgangsmaterial für Recyclingprozesse ergibt sich aus der Tatsache, dass in den Magneten 30 Gewichtsprozent exakt der Seltenerdelemente enthalten sind, die für die Produktion neuer Permanentmagnete benötigt werden. Dieser hohe Gehalt an Seltenen Erden findet sich nicht annähernd in einer der weltweiten natürlichen Lagerstätten. Ein weiterer Vorteil der Permanentmagnete als Ausgangsmaterial ist der Umstand, dass die sehr aufwendigen chemischen Prozesse zur Abtrennung der vielen weiteren Seltenerdelemente (Lanthan, Cer usw.), die nicht für die Produktion von Neodym-Eisen-Bor-Magneten benötigt werden, entfallen [SKN 2023]. Zwei kleine erste Recyclinganlagen für Neodym-Eisen-Bor-Magnete sollen 2023/2024 im Vereinigten Königreich und in Deutschland in Betrieb gehen.

Neben den Permanentmagneten aus End-of-Life-Elektromotoren kommen noch zahlreiche weitere End-of-Life-Quellen für das Recycling von Permanentmagneten und Seltenen Erden in Betracht. Hierzu zählen nicht zuletzt die häufig mehrere hundert Kilogramm (je Anlage) umfassenden Neodym-Eisen-Bor-Magneten aus Windkraftanlagen, die ein attraktives Recyclingreservoir darstellen. Aufgrund der hohen Lebensdauer von Windkraftanlagen (20 Jahre oder auch mehr) wird dieses Potenzial etwas später als das Recyclingpotenzial von den Antriebsmotoren zum Tragen kommen [SKN 2023].

4.3 Wertschöpfungskette Brennstoffzellen

Brennstoffzellen für Fahrzeuge²⁰ sind PEM-Brennstoffzellen, die als wertvollen Schlüsselrohstoff das Edelmetall Platin in relevanten Mengen benötigen. Die globale Minenproduktion für Platin liegt seit Jahren in einer weitgehend stabilen Größenordnung. Im Jahr 2021 wurden nach [USGS 2023] 190 t Platin aus natürlichen Lagerstätten gewonnen. In der nachfolgenden Abbildung sind die Anteile der wesentlichen Förderländer dargestellt.

Abbildung 4-8: Minenförderung Platin 2021

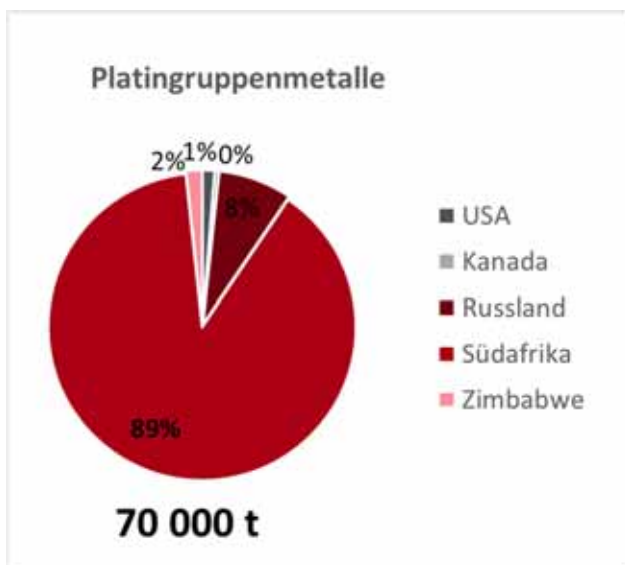


²⁰ Im Rahmen dieser Studie werden Brennstoffzellenfahrzeuge nur in einem Szenario und ausschließlich für schwere Nutzfahrzeuge betrachtet.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [USGS 2023]

Südafrika ist traditionell mit Abstand das wichtigste Förderland für Platin mit einem Anteil von 74 % an der globalen Minenproduktion 2021. Danach folgt Zimbabwe mit einem Anteil von 8 %. Kanada, Russland und weitere Länder tragen nur zu einem geringen Prozentanteil zur globalen Minenproduktion für Platin bei [USGS 2023]. In der nachfolgenden Abbildung sind die bekannten globalen Reserven an Platingruppenmetallen²¹ insgesamt (rund 70.000 t) aufgeführt – wobei Platin hier dominiert,²² dies zeigt sich auch am hohen Anteil Südafrikas (89 %) an den globalen Reserven. Eine weitere Diversifizierung über Südafrika hinaus ist daher eher nicht zu erwarten.

Abbildung 4-9: Reserven Platingruppenmetalle



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [USGS 2023]

Da Platin aus diversen Anwendungen wie Schmuck, Industriekatalysatoren, Spezialanwendungen in der Glasindustrie und nicht zuletzt Autoabgaskatalysatoren mit sehr hohen Rückgewinnungsraten (z. T. mit deutlich > 90 %) zurückgewonnen werden kann, ist für die Platinversorgung Sekundärplatin aus dem Recycling unbedingt zu berücksichtigen [Hagelücken 2005]. Dies gilt generell auf globaler Ebene [UNEP 2011] und gerade deutsche und europäische Unternehmen sind hier mit professionellen Strukturen und innovativen Aufbereitungs- und Refiningprozessen in einer ausgezeichneten Position [SKN 2023]. So wird für das Jahr 2018 ein Anteil von 44 % Sekundärplatin an der Versorgung berichtet. Nicht zuletzt aus dem Recycling von Autoabgaskatalysatoren ist dieser Anteil in den letzten beiden Jahrzehnten ständig gestiegen [Hagelücken 2020].

Aus den Szenarienergebnissen im Abschnitt 3 geht hervor, dass eine zukünftige Platinversorgung von PEM-Brennstoffzellen für Nutzfahrzeuge ohne weiteres aus Sekundärplatin aus dem Recycling von Autoabgaskatalysatoren von End-Of-Life Fahrzeugen gedeckt werden kann. Dies gilt selbstverständlich nicht nur für Deutschland, sondern kann mit einem Verbrenner Phase-out auch für den globalen Maßstab erwartet werden. Mit der Transformation zur Elektromobilität geht dann in den

²¹ Neben Platin umfassen die Platingruppenmetalle noch Palladium, Rhodium, Ruthenium, Iridium und Osmium.

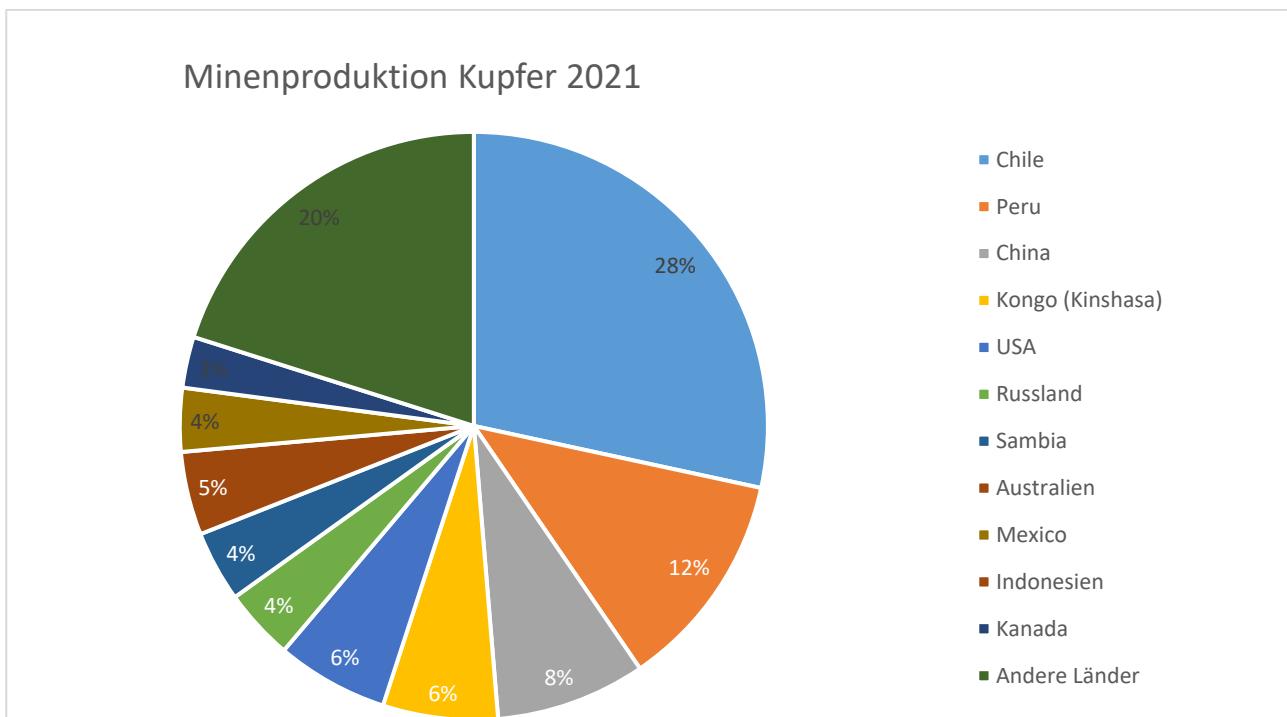
²² Nur Palladium wird in ähnlicher Größenordnung gefördert wie Platin. Rhodium, Ruthenium, Iridium und Osmium sind in den natürlichen Vorkommen in geringeren Konzentrationen als Begleitmetalle enthalten. Deren Förderung beträgt nur einige wenige Tonnen pro Jahr.

nächsten 15 Jahren der Platinbedarf für neue Autoabgaskatalysatoren stark zurück. Daher kann insgesamt bzgl. der Platinversorgung keine ernsthafte Herausforderung festgestellt werden. In diesem Zusammenhang ist wichtig hervorzuheben, dass die Herstellung von Platin über Recyclingprozesse mit erheblich geringeren Umweltbelastungen verbunden ist als die Herstellung über die Primärroute, die mit dem Bergbau aus natürlichen Lagerstätten startet [Hagelüken 2005, Betz et al. 2021a]. Das Recycling von Platin trägt also nicht nur maßgeblich zur Versorgungssicherheit bei, sondern auch zu einem deutlich kleineren ökologischen Fußabdruck.

4.4 Sonstige Wertschöpfungsketten

Neben den zuvor beschriebenen Wertschöpfungsketten, die wichtige Fahrzeugkomponenten betreffen, ist durch die Antriebswende vor allem die Wertschöpfungskette für das Basismetall Kupfer tangiert. Wie aber bereits in Abschnitt 3 ausgeführt, ist die Kupfernachfrage in Deutschland durch Nachfrage aus den unterschiedlichsten schon länger bestehenden Branchen und Anwendungen schon seit vielen Jahren sehr hoch. Die Antriebswende sorgt zwar für eine zusätzliche Nachfrage, kann aber keinesfalls als „Gamechanger“ für die Wertschöpfungskette Kupfer eingestuft werden. In der nachfolgenden Abbildung ist die Aufteilung der Minenproduktion für Kupfer für das Jahr 2021 dargestellt.

Abbildung 4-10: Minenförderung Kupfer 2021

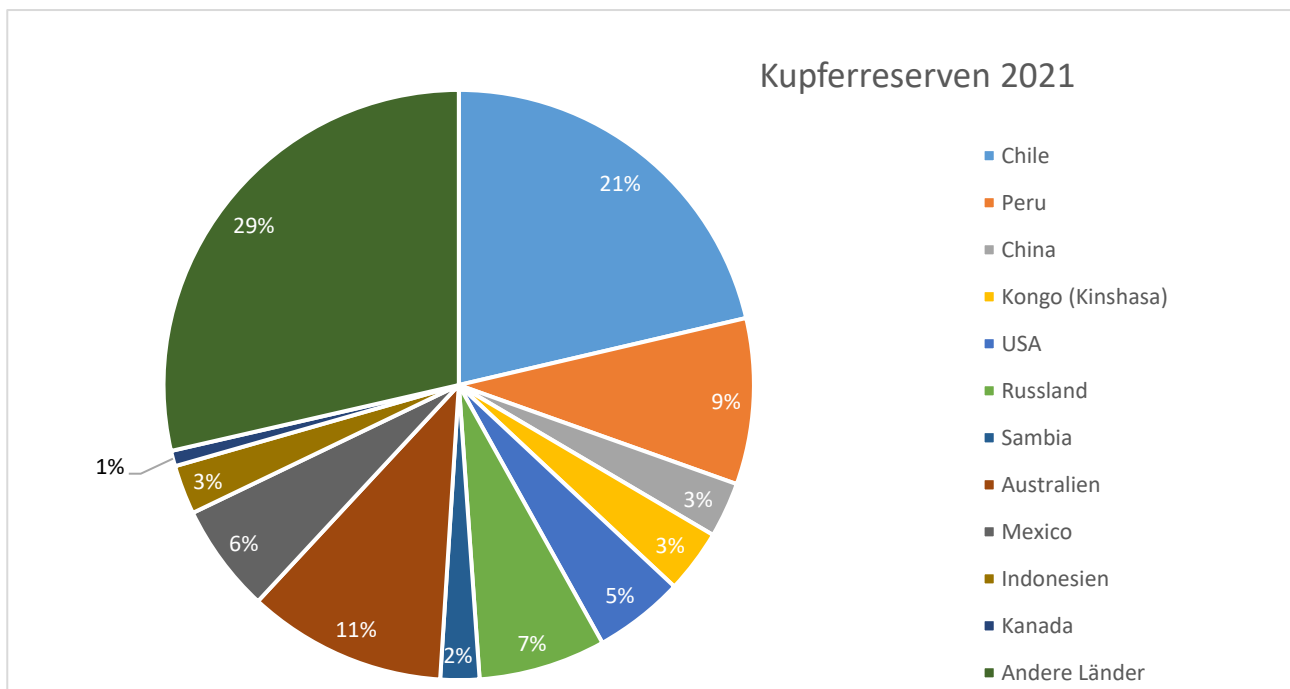


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [USGS 2023]

Weltweit betrug die Minenproduktion für Kupfer im Jahr 2021 21,2 Mio. Tonnen. Führende Länder sind hier Chile mit 28 % Anteil und Peru mit 12 % Anteil. Aus der Graphik geht weiterhin hervor, dass die Minenförderung gegenüber anderen Rohstoffen vergleichsweise differenziert ist. Wichtig ist

weiterhin zur Einordnung der Wertschöpfungskette Kupfer, dass die Produktion von Raffinadekupfer²³ weltweit im Jahr 2021 25,3 Mio. Tonnen betrug, davon wurden 615.000 Tonnen allein in Deutschland hergestellt [USGS 2023]. Die deutlich höhere Produktionsmenge an Raffinadekupfer im Vergleich zur Minenproduktion an Kupfer, lässt sich durch die Tatsache begründen, dass Kupfer sich ohne Funktionalitätsverlust sehr gut recyceln lässt. Global beträgt der Anteil des Sekundärmaterials an der Kupferraffinadeproduktion rund 17 %, in Deutschland liegt der Wert mit rund 41 % bereits beträchtlich höher [Gilsbach 2020]. In der nachfolgenden Abbildung sind Länderanteile an den globalen Kupferreserven dargestellt. Daraus geht hervor, dass auch die Kupferreserven auf eine vergleichsweise hohe Zahl an Ländern verteilt ist – wenngleich Chile hier ebenfalls mit 21 % Anteil die Nummer eins in der Welt ist. Aktuell wird die gewaltige Menge von 890 Mio. Tonnen an Kupferreserven in der Welt ausgewiesen [USGS 2023].

Abbildung 4-11: Kupferreserven 2021



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [USGS 2023]

Zusammenfassend lässt sich für die Wertschöpfungskette Kupfer feststellen, dass die Anbieterstruktur sehr breit aufgestellt ist und Deutschland über relevante eigene Produktionskapazitäten für Raffinadekupfer verfügt. Recycling von Kupfer trägt bereits heute stark zur Kupferversorgung Deutschlands bei. Im Hinblick auf die Szenarienergebnisse in dieser Studie lässt sich nicht zuletzt aus dem zukünftigen Recycling von Batterien und Elektromotoren eine weitere Stärkung der Wertschöpfungskette Kupfer erwarten. Daher kann die zukünftige Versorgungssituation für Kupfer als nicht problematisch eingeschätzt werden.

Bei den zusätzlichen Stromerzeugungsinfrastrukturen für Erneuerbare Energien sind die Wertschöpfungsketten für Windkraftanlagen (on-shore und off-shore) sowie Photovoltaik in den Blick zu nehmen. Im Falle der Windkraftanlagen sind als strategische Komponente in erster Linie Permanentmagnete (Neodym-Eisen-Bor-Magnete) mit den Rohstoffen aus der Gruppe der Seltenen Erden

²³ Raffinadekupfer ist die übliche Qualitätsklasse von Kupfer, welches dann für die unterschiedlichsten Anwendungen wie Elektronik weiterverarbeitet wird.

von Relevanz [SKN 2023]. Auf die Herausforderungen bei der Wertschöpfungskette der Permanentmagnete wurde bereits im Abschnitt über Elektromotoren ausführlich eingegangen (siehe oben). Allerdings sind die Bedarfsmengen bezüglich Neodym-Eisen-Bor-Magneten und damit der Leichten Seltenen Erden Neodym und Praseodym sowie der Schweren Seltenen Erden Dysprosium und Terbium im Rahmen der in dieser Studie behandelten Szenarien für die Elektromotoren der Fahrzeuge deutlich höher als für die Generatoren der Windkraftanlagen, die für die zusätzliche Erzeugung erneuerbaren Stroms benötigt werden.

Bei Photovoltaik hat die Wafer basierte Technologie (kristallines Silizium) einen überragenden Marktanteil und wird diesen auch mittel- und langfristig behalten [SKN 2023]. Die diversen Dünnschichtvarianten bei der Photovoltaik werden auch zukünftig nur eine untergeordnete Rolle spielen und können daher nicht weiter in den Fokus genommen werden. Von der Rohstoffseite her bestehen für die Wertschöpfungskette Photovoltaik seitens kristallinen Siliziums keine Versorgungsprobleme. Weltweit ist für die Produktionskapazität an Wafer basierten Solarmodulen aktuell auch ein signifikantes Überangebot mit entsprechendem Preisverfall festzustellen. Allerdings ist dies ausschließlich auf massive Ausweitungen der Produktionskapazitäten in der VR China zurückzuführen, die für strategische Wertschöpfungsstufen der Wafer basierten PV-Module, wie Ingots/Wafer mit 96,8 % Weltmarktanteil und Solarzellen mit 85,2 % Weltmarktanteil, bereits jetzt eine sehr dominante Marktmacht innehaben [SKN 2023].

Aktuell wird Europa nicht zuletzt durch Importrestriktionen der USA (Gesetz zur Verhinderung von Zwangsarbeit in der Uigurischen Volksrepublik) mit großen Volumina von in der VR China produzierten Solarmodulen regelrecht überschwemmt. Dies wird von der europäischen Solarindustrie für den vorgesehenen Wiederaufbau einer europäischen Solarindustrie als existentielle Gefahr gesehen [Solarserver 2023]. Bei der Wertschöpfungskette der Wafer basierten Photovoltaik besteht demnach die Herausforderung nicht in einem Angebotsdefizit angesichts rasanter Nachfrage (vgl. demgegenüber die Diskussion zum Nachfrage- Angebotsverhältnis für Lithium bis zu Jahr 2030), sondern in der zunehmenden Anbieterkonzentration durch die VR China. Die wirtschaftlichen und politischen Folgen der bis in jüngster Zeit dominanten Erdgasversorgung Deutschlands durch Russland sind hier ein warnendes Beispiel.

4.5 Fazit Bewertung der Wertschöpfungsketten

Die Antriebswende bei Straßenfahrzeugen stellt in erster Linie Herausforderungen an die Wertschöpfungsketten der Lithium-Ionen-Batterien und Permanentmagnete für Elektromotoren. Aufgrund des rasanten Hochlaufs von Elektrofahrzeugen sowohl im Pkw- als auch im Lkw-Bereich bis 2030/2035 müssen die entsprechenden Wertschöpfungsketten in quantitativer Sicht ebenso rasch wachsen, bei konstant hoher Qualität der entsprechenden Komponenten. Durch teilweise sehr starke Marktkonzentrationen wichtiger Stufen dieser Wertschöpfungsketten in der VR China bzw. durch chinesische Unternehmen sind diese Herausforderungen noch anspruchsvoller. Allerdings haben die Szenarien gezeigt, dass der zusätzliche Bedarf an Rohstoffen durch Lkw gegenüber Pkw und leichten Nutzfahrzeugen nur moderate Auswirkungen auf den Gesamtbedarf hat, da die Menge an Fahrzeugen im Lkw-Sektor vergleichsweise gering ist. Da diese jedoch sehr viel stärker genutzt werden, haben sie eine sehr hohe prozentuale Bedeutung für den Energieverbrauch des Mobilitätssektors. Damit einher geht ein großer Strombedarf, mehr benötigte Energie- und Ladeinfrastruktur aber auch ein hohes Potenzial zur Einsparung von THG-Emissionen durch Verminderung des Dieserverbrauchs. Demnach lohnen sich die Investitionen in die vergleichsweise großen Batterien und die Ladeinfrastruktur für Lkw, da diese überproportional zur THG-Neutralität in Deutschland beitragen.

Im Rahmen dieser Studie wurden ausschließlich die Rohstoffbedarfe für die Elektrifizierung der Pkw- und Lkw-Flotten in Deutschland über die Szenarien abgebildet. In einer kürzlich veröffentlichten Arbeit wurden auch die globalen Bedarfsanstiege für Schlüsselrohstoffe der Elektromobilität ermittelt [SKN 2023], die in der globalen Dimension natürlich erheblich größer ausfallen. Über einen Abgleich der globalen Bedarfsmengen mit den globalen Reserven der Schlüsselrohstoffe wie Lithium, Kobalt, Seltene Erden usw. lassen sich in keinen Fall rein physische Verknappungen identifizieren. Allerdings gilt für den globalen Hochlauf der Elektromobilität die gleiche Erkenntnis wie für die rein nationale Betrachtung: der rasante Hochlauf seitens der Nachfrageseite nach Schlüsselrohstoffen, -komponenten und -produkten für die Elektromobilität muss mit einem adäquat rasanten Hochlauf auf der Angebotsseite, d. h. der Ausweitung der Kapazitäten zur Rohstoffförderung und -verarbeitung, der Produktion von Schlüsselkomponenten wie Kathoden- und Anodenmaterial für Lithium-Ionen-Zellen, der Produktion von Permanentmagneten für Elektromotoren usw. einher gehen. Und Angebotskonzentrationen einzelner Länder für strategische Stufen der Wertschöpfungsketten können im globalen Wettbewerb umso stärker Risiken bergen für eine zeitnahe Befriedigung der Nachfrage.

Im nachfolgenden Abschnitt werden strategische Empfehlungen formuliert, die zu einer nachhaltigen Stärkung der genannten Wertschöpfungsketten für die Antriebswende in Deutschland und Europa beitragen können.

5 Empfehlungen aus den Ergebnissen der Studie

Die Wertschöpfungsketten für Lithium-Ionen-Batterien und Permanentmagnete für Elektromotoren gilt es in den nächsten Jahren nachhaltig zu stärken, um die Antriebswende im Bereich Pkw und Lkw bis hin zur Klimaneutralität im Jahr 2045 zu ermöglichen. Drei wesentliche Pfeiler können hierfür hervorgehoben werden:

- Stärkere Rohstoffversorgung aus natürlichen Vorkommen innerhalb der EU sowie Stärkung der gesamten Wertschöpfungskette für Lithium-Ionen-Batterien und Permanentmagnete für Elektromotoren in Europa,
- stärkere Diversifizierung der Lieferländer von Rohstoffen und Schlüsselkomponenten und
- konsequente Erschließung von Recyclingpotenzialen für Schlüsselrohstoffe.

Stärkere Rohstoffversorgung aus natürlichen Vorkommen innerhalb der EU sowie Stärkung der gesamten Wertschöpfungskette für Lithium-Ionen-Batterien in Europa

In Europa hat die wachsende Besorgnis hinsichtlich einer sicheren Versorgung mit strategischen Rohstoffen und stabilen Wertschöpfungsketten im Frühjahr 2023 zum Entwurf der EU-Kommission zum Critical Raw Materials Act geführt [CRMA 2023]. Darin wird für strategische Rohstoffe eine Quote für eine Rohstoffgewinnung von 10 % und für die Verarbeitungskapazität entlang der Wertschöpfungskette von 40 % bis 2030 gefordert. Nach jüngsten Meldungen wollen die EU-Mitgliedsstaaten das 40 %-Ziel gar auf 50 % bis 2030 anheben [Packroff 2023].

Lithium-Ionen-Batterien werden durch den Critical Raw Materials Act deutlich adressiert, da Lithium, Nickel, Mangan und Graphit (alle jeweils in Batteriequalität), Kobalt und Kupfer im Anhang I zu [CRMA 2023] explizit als strategische Rohstoffe aufgeführt sind. Da bis auf nennenswerte Minenproduktionen an Kupfer und etwas Nickel derzeit keine relevanten Mengen an den genannten Schlüsselrohstoffen in der EU aus natürlichen Vorkommen gewonnen werden [SKN 2023], wird empfohlen die Ziele des Critical Raw Materials Act hinsichtlich einer stärkeren Rohstoffgewinnung aus Vor-

kommen innerhalb der EU ambitioniert zu unterstützen. Vor allem für eine zukünftige Rohstoffgewinnung von Lithiumsalzen sind in zahlreichen Ländern der EU diverse Projekte aktuell in unterschiedlichen Projektphasen aktiv. Über entsprechende unternehmerische Aktivitäten wird u. a. aus Finnland [Keliber 2023], Österreich [European Lithium 2020], Frankreich, [Imerys 2022, Eramet 2023], Portugal [Savannah resources 2023] und Spanien [Stockhead 2021] berichtet.

Aber auch in Deutschland sind Unternehmen in Projekten involviert, um natürliche Lithiumvorkommen zukünftig auszubeuten. Hier sind sowohl Projekte aus dem Erzgebirge, die auf klassischen bergmännischen Abbau der lithiumhaltigen Erze setzen [Zinnwald 2023] als auch die geplante Gewinnung von Lithiumsalzen aus dem großen Reservoir an Tiefenthalwasser aus dem Oberrheingraben zu nennen. Letzteres plant in Kombination mit Geothermie über neuartige Sorptionsverfahren eine Gewinnung von Lithiumsalzen im industriellen Maßstab bis zum Jahr 2025 [Vulcan Energy 2023].

Die DERA BGR hält nach unterschiedlichen Szenarien eine Eigenversorgungsquote der EU an Lithium bis 2030 von 30 % für möglich, wenn ausreichend Minenprojekte in der EU realisiert werden und Recyclingpotenziale für Lithium erschlossen werden [Al Barazi 2022]. Es wird daher empfohlen, im Rahmen der Möglichkeiten des Ressorts und in Abstimmung mit der Bundesregierung und der Europäischen Kommission alle zielführenden Maßnahmen zu ergreifen, um dieses ambitionierte Ziel bzgl. der Lithiumversorgung robust zu unterstützen. Weiterhin wird im Sinne des Critical Raw Materials Acts empfohlen auch den Aufbau und die Errichtung von Weiterverarbeitungskapazitäten für Lithiumverbindungen in Batteriequalität („Lithiumraffinerien“) sowie die Stärkung von weiteren Stufen der Wertschöpfungskette (Kathoden und Anodenmaterialproduktion, Produktion von Lithium-Ionen-Zellen – „Gigafactories“) sowohl in Deutschland als auch in Partnerländern der EU zu unterstützen [SKN 2023]. Hier kann für ausgewählte Investitionsprojekte das europäische Instrument der IPCEI für die Auslösung größerer Investitionen genutzt werden [IPCEI Batteries 2023]. Hier sind bereits 14 Deutsche Projekte bewilligt (Summer-IPCEI und Autumn-IPCEI bzw. EuBatIn), die eine ökonomisch und ökologisch nachhaltige und technologisch souveräne Abdeckung der Wertschöpfungskette Batterie mit dem Aufbau eigener Kapazitäten für die Batterieproduktion in Deutschland zum Ziel haben. Inhaltlich kann dabei die gesamte Wertschöpfungskette, von der Ressourcengewinnung, Materialraffinerie und -synthese über die eigentliche Batteriezellfertigung und Nutzung der Batterien in Produkten bis hin zu Recycling und Zweitverwendung berücksichtigt werden. Eine Erweiterung der beiden Batterie-IPCEIs kann in Zukunft jedoch sinnvoll sein, um Lücken in der Wertschöpfungskette zu adressieren.

Stärkere Diversifizierung der Lieferländer von Rohstoffen und Schlüsselkomponenten für Lithium-Ionen-Batterien

Eine komplette Eigenversorgung der EU bzgl. der wesentlichen Stufen der Wertschöpfungskette für Lithium-Ionen-Batterien ist auf absehbare Zeit weder realistisch möglich noch unbedingt nötig. In Ergänzung zu einer oben geschilderten Empfehlung die Wertschöpfungskette innerhalb der EU zu stärken, wird eine stärkere Diversifizierung der Lieferländer von außerhalb der EU im Sinne eines „De-Risking“ empfohlen. Hier bieten sich z. B. für die Lithiumversorgung bestehende Partnerländer wie Chile oder Brasilien, aber auch neue Partnerländer wie beispielsweise Kanada, Ghana oder Namibia an [SKN 2023]. Es wird empfohlen hier Partnerschaften im Rohstoff-, Technologie- sowie Bildungs- und Forschungsbereich massiv auszuweiten.

Konsequente Erschließung von Recyclingpotenzialen für Schlüsselrohstoffe für Lithium-Ionen-Batterien

Im vorangegangenen Abschnitt wurde herausgearbeitet, dass sich in den nächsten Jahren über das Jahr 2030 und 2035 bis 2040 und darüber hinaus ein deutlich wachsendes Sekundärrohstoffpotenzial für wichtige Schlüsselrohstoffe wie Lithium, Kobalt, Nickel und Kupfer aufbaut, dass es zur Stärkung der Wertschöpfungskette in Deutschland bzw. der EU möglichst effizient zu erschließen gilt. Die Erschließung dieses wachsenden Recyclingpotenzials kann mittel- und langfristig maßgeblich zu einer stärkeren Unabhängigkeit Europas bzgl. der Schlüsselversorgung mit strategischen Rohstoffen wie Lithium beitragen. Es wird aus diesen Gründen nachdrücklich empfohlen die Umsetzung der Vorgaben der neuen EU Battery Regulation [BatReg 2023] in Deutschland sicherzustellen.

Hier sind in den letzten Jahren noch wichtige Arbeiten zu delegierten Rechtsakten zu unterstützen, welche die zahlreichen Vorgaben der neuen EU Battery Regulation noch konkretisieren müssen. Das BMWK und weitere Bundesressorts haben bereits seit vielen Jahren durch Förderung umfassender Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum Recycling von Lithium-Ionen-Batterien zu technologischen Innovationen bei diesen anspruchsvollen Verfahren beigetragen und die entsprechende Unternehmenslandschaft in Deutschland gestärkt (vgl. z. B. [Sojka et al 2023]). Entsprechend sind inzwischen eine zunehmende Zahl von Unternehmen mit unterschiedlichen Verfahren auf verschiedenen Stufen der Recyclingkette aktiv und investieren zunehmend in die Ausweitung notwendiger Aufbereitungs- und Recyclingkapazitäten.

Stärkung der gesamten Wertschöpfungskette für Permanentmagnete für Elektromotoren in Europa

Wie in den vorangegangenen Abschnitten klar herausgearbeitet wurde, sind neben den Lithium-Ionen-Batterien die Elektromotoren mit Permanentmagneten (Neodym-Eisen-Bor-Magnete) die für die Antriebswende zweite strategische Wertschöpfungskette, die es für Deutschland bzw. Europa unbedingt zu stärken gilt. Im Vergleich zur Wertschöpfungskette Lithium-Ionen-Batterien wo durch massive Aktivitäten der Bundesregierung und der EU (auch finanzieller Art) deutliche Investitionen innerhalb der EU bereits angeschoben wurden [SKN 2023, Peter et al. 2022], besteht für die Wertschöpfungskette der Permanentmagnete noch besonders dringend Handlungsbedarf [ERMA 2021].

Sowohl der Entwurf zum Critical Raw Materials Act [CRMA 2023] als auch der kürzlich von der Europäischen Kommission vorgelegte Entwurf zur Revision der Europäischen Altfahrzeug-Richtlinie [EC 2023] adressieren sehr nachdrücklich die Stärkung der Wertschöpfungskette der Permanentmagnete. In diesen Entwurfsdokumenten der Europäischen Kommission sind zahlreiche Vorschläge für eine Stärkung der Wertschöpfungskette der Seltenen Erden bzw. der Permanentmagnete enthalten wie z. B. eine Ausbaupflicht von Elektromotoren aus End-of-Life-Fahrzeugen (als erster notwendiger Schritt für eine Verwertung der Permanentmagnete) und mögliche Recyclingquoten sowie Rezyklateinsatzquoten für Sekundärmaterial in neuen Permanentmagneten. Es wird empfohlen, dass die Bundesregierung in den nächsten Monaten und Jahren im Rahmen der Trilog-Verfahren die weitere Ausarbeitung und zügige Realisierung dieser wichtigen rechtlichen Rahmenbedingungen maßgeblich unterstützt. Nach [ERMA 2021] besteht das Ziel, die Produktionskapazität für Neodym-Bor-Magnete in der EU von heute rund 1.000 Jahrestonnen auf 7.000 Jahrestonnen zu erhöhen bis zum Jahr 2030. Dies würde für den dann deutlich höheren Bedarf der EU rund 20 % Eigenversorgung bedeuten.

Stärkere Diversifizierung der Lieferländer von Rohstoffen und Schlüsselkomponenten für Permanentmagnete

Ebenso wie bei der Wertschöpfungskette der Lithium-Ionen-Batterien gilt es bei der Wertschöpfungskette der Permanentmagnete für Elektromotoren ebenfalls die Diversifizierung der Lieferländer

außerhalb der EU deutlich auszuweiten, um die sehr starke Dominanz der VR China hier zu reduzieren. Da in zahlreichen Ländern natürliche Vorkommen in größeren Mengen vorhanden sind, wird empfohlen mit ausgewählten Partnerländern hier in den nächsten Jahren Rohstoff- und Technologiepartnerschaften abzuschließen. Wichtige Kriterien für die Auswahl dieser Partnerländer sind u. a. möglichst bereits weit gediehene Projekte, eine gute Governance und vorteilhafte logistische Anbindungen wie vorhandene Seehäfen, Straßen- und Schieneninfrastruktur usw. In [SKN 2023] werden entsprechend Länder wie Australien, Kanada, Kolumbien, Malawi und Namibia für den Bereich der Seltenen Erden empfohlen.

Maßnahmen zur Reduzierung der Batteriegrößen

Es sollten zukünftig Energieeffizienzstandards für BEV-Fahrzeuge ausgearbeitet und eingeführt werden, die den Stromverbrauch je 100 km adressieren. Damit könnten mit kleineren und damit weniger rohstoffintensiven Batterien die gleichen Reichweiten erzielt werden. Im Bereich des Beschaffungswesens des Bundes könnten hier zusätzlich Impulse zur Anschaffung weniger rohstoffintensiver Modelle gelegt werden. Weiterhin ist der forcierte Ausbau der Ladeinfrastruktur – und hier vor allem der Schnellladeinfrastruktur – eine wichtige flankierende Maßnahme, um der sogenannten „Reichweitenangst“ zu begegnen und den Trend zu kleineren und damit weniger rohstoff- und auch weniger kostenintensiven Antriebsbatterien zu unterstützen.

Forcierung der Verkehrswende neben der Antriebswende

Die in dieser Studie aufgestellten und im Detail ausgewerteten Szenarien fokussieren ausschließlich auf die Antriebswende als wichtiger Teil der Verkehrswende. Die Ergebnisse zeigen jedoch deutlich, dass der Anstieg der Nachfrage nach Schlüsselkomponenten und Rohstoffen nicht zuletzt von der Stückzahl der jeweiligen Fahrzeuge abhängt. Pkw tragen dazu in besonderem Maße bei. Es wird daher – ungeachtet der hier formulierten Beiträge zur Stärkung der Antriebswende – nachdrücklich empfohlen zusätzlich Maßnahmen zur Stärkung des öffentlichen Personen- und Güterverkehrs zu unterstützen. Eine Steigerung des öffentlichen Personenverkehrs sowie Maßnahmen zur Stärkung des Güterverkehrs auf der Schiene können wichtige Bausteine zur Dämpfung von Nachfragespitzen sowohl bzgl. Rohstoffen als auch bei elektrischer Energie sein.

6 Referenzen

[Al Barazi 2022]: Al Barazi, S. (2022). Battery Raw Materials Outlook for Demand and Supply in Europe. 3rd Future Battery Forum. DERA.

[Baron et al. 2023]: Baron, Y., Kosińska-Terrade, I., Loew, C., Köhler, A., Moch, K., Sutter, J., Graulich, K., Adjei, F., Mehlhart, G. (2023): Study to Support the Impact Assessment for the Review of Directive 2000/53/EC on End-of-Life Vehicles.

https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/ELV_IA_supporting-study_final_report.pdf (30.08.2023).

[BatReg 2023]: REGULATION (EU) 2023/1542 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1542> (15.09.2023).

[Betz et al. 2021a]: Betz, J., Buchert, M., Dolega, P., Bulach, W., T&E, L. M., & Helms, H. (2021). Resource consumption of the passenger vehicle sector in Germany until 2035—the impact of different drive systems.

[Betz et al. 2021b]: Betz, J., Degreif, S., Dolega, P. (2021). State of Play and Roadmap Concept: Mobility Sector. https://re-sourcing.eu/content/uploads/2022/11/sop_mobility_sector-1.pdf (30.08.2023).

[Benchmark Minerals 2022]: Benchmark Minerals Source. (2022). Infographic: China's lithium ion battery supply chain dominance. <https://source.benchmarkminerals.com/article/infographic-chinas-lithium-ion-battery-supply-chain-dominance> (30.08.2023).

[Benchmark Minerals 2023]: Benchmark Minerals Source. (2023). CATL's faster charging battery could boost uptake of LFP cells <https://source.benchmarkminerals.com/article/catls-faster-charging-battery-could-boost-uptake-of-lfp-cells> (30.08.2023).

[BGR 2021]: BGR (2021): Kupfer – Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Mai 2021.

https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/kupfer%202021.pdf;jsessionid=0C4958865BBD98B93A859D837848A278.internet961?_blob=publicationFile&v=3 (11.09.2023).

[BMDV 2022]: BMDV - Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2022). Masterplan Ladeinfrastruktur II, 1. Regierungsentwurf.

[BNetzA 2023]: Bundesnetzagentur (2023). Bundesnetzagentur veröffentlicht Daten zum Strommarkt 2022. Online verfügbar:

https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/20230104_smard.html (04.09.2023).

[BReg 2023]: Bundesregierung (2023): Entwurf eines Dritten Gesetzes zur Änderung maurechtlicher Vorschriften. Stand 15.06.2023.

[Buchert et al. 2019]: Buchert, M.; Degreif, S.; Bulach, W.; Schüler, D.; Prakash, S.; Möller, M.; Köhler, A. (Öko-Institut) und Behrendt, S.; Nolte, R.; Röben, A. (IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH) (2019): Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potenzialermittlung für Second-Best-Lösungen, im Auftrag des Umweltbundesamtes.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-01-14_texte_03-2019_subskrit_abschlussbericht.pdf (12.09.2023).

[CRMA 2023]: Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020. Brüssel: Europäische Kommission. https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/european-criticalraw-materials-act_en (14.09.2023).

[Dolega et al. 2020]: Dolega, P., Buchert, M., & Betz, J. (2020). Environmental and socio-economic challenges in battery supply chains: graphite and lithium. Short study prepared within the framework of the BMBF joint project Fab4Lib. Research on measures to increase material and process efficiency in lithium-ion battery cell production along the entire value chain.

[DVGW 2023]: Horn, R. (2023). H2-Tauglichkeit von Stählen, DVGW 31.03.2023, <https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsprojekt-h2-tauglichkeit-von-staehlen/> (11.09.2023).

[EC 2023]: Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on circularity requirements for vehicle design and on management of end-of-life vehicles, amending Regulations (EU) 2018/858 and 2019/1020 and repealing Directives 2000/53/EC and 2005/64/EC. https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-regulation-circularity-requirements-vehicle-design-and-management-end-life-vehicles_en (15.09.2023)

[Eramet 2023]: French lithium for electric vehicle batteries, Producing lithium «made in France» is the ambition of Eramet and Électricité de Strasbourg, who are involved in a joint project for the sustainable development of Alsatian lithium. <https://www.eramet.com/en/activities/innovate-design/eugeli-project> (14.09.2023).

[ERMA 2021]: Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action. A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster of the European Raw Materials Alliance. Berlin: ERMA.

[EU 2023] Europäisches Parlament, Europäischer Rat (2023). Verordnung (EU) 2023/851 vom 19. April 2023 zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631 im Hinblick auf eine Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge im Einklang mit den ehrgeizigeren Klimazielen der Union.

[European Lithium 2020]: Wolfsberg Lithium Project – Project Highlights. <https://europeanlithium.com/wolfsberg-lithium-project/> (14.09.2023).

[Fraunhofer IEE 2022]: Pfennig, M.; Böttger, D., Häckner, B.; Geiger, D., Zink, C., Bisevic, A., Jansen, L.: Global GIS-based potential analysis and cost assessment of Power-to-X fuels in 2050, Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE; <https://arxiv.org/pdf/2208.14887>, <https://maps.iee.fraunhofer.de/ptx-atlas/>; (12.09.2023).

[Gilsbach 2020]: Gilsbach, L. (2020). Kupfer – Informationen zur Nachhaltigkeit. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe – BGR (Hrsg.), Juli 2020.

[Göckeler et al. 2023]: K. Göckeler, I. Steinbach, W. K. Görz, F. Hacker, R. Blanck, M. Mottschall (2023). StratES – Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs. Studie auf Basis von Markthochlaufmodellierungen. Dritter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens StratES. Berlin: Öko-Institut.

[Hacker et al. 2020]: Hacker, F.; Blanck, R.; Görz, W. (2020). StratON Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge, Endbericht. Öko-Institut; Hochschule Heilbronn; Fraunhofer IAO; ITP.

[Hagelüken 2005]: Hagelüken, C.; Buchert, M.; Stahl, H. (2005): Stoffströme der Platingruppenmetalle.

https://www.researchgate.net/profile/Christian_Hagelueken/publication/270687039_Materials_Flow_of_Platinum_Group_Metals/links/55cf8f7b08ae502646aa455e/Materials-Flow-of-Platinum-Group-Metals.pdf (08.09.2023).

[Hagelüken 2020]: Hagelüken, C. (2020): Business as unusual – Anforderungen für eine Kreislaufwirtschaft bei Lithium-Ionen-Batterien. Presentation C. Hagelüken (Umicore), Berlin Recycling and Secondary Raw Materials Conference, 2. March 2020. <https://muellundabfall.de/ce/business-as-unusual/detail.html> (06.09.2023).

[Harthan et al. 2023]: Harthan, R.O.; Förster, H.; Borkowski, K.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W.K.; Hennenberg, K.; Jansen, L.L.; Jörß, W.; Kasten, P.; Loreck, C.; Ludig, S.; Matthes, F.C.; Mendelewitsch, R.; Moosmann, L.; Nissen, C.; Repenning, J.; Scheffler, M.; Steinbach, I.; Bei der Wieden, M.; Wiegmann, K.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Mandel, T.; Rehfeldt, M.; Rohde, C.; Yu, Y.; Steinbach, J.; Deurer, J.; Fuß, R.; Rock, J.; Osterburg, B.; Rüter, S.; Adam, S.; Dunger, K.; Rösemann, C.; Stümer, W.; Tiemeyer, B.; Vos C. (2023). Projektionsbericht 2023 für Deutschland. Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES GmbH, Thünen-Institut: Berlin, Freiburg, Darmstadt, Karlsruhe, Braunschweig, Hamburg, Eberswalde. Umweltbundesamt (Hg.).

[Helms et al. 2022]: Helms, H.; Biemann, K.; Jöhrens, J.; Bruch, B. Strategien und Klimabilanzen des Infrastrukturaufbaus für die Defossilisierung im Straßengüterverkehr. Ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung. Internationale Wiener Motorsymposien.

[Hewett 2023]: Hewett, J. (2023). Why speculative investors dominate in rare earths debate, in Financial Review, 16. August 2023, <https://www.afr.com/politics/federal/australia-is-on-the-frontline-in-battle-for-rare-earth-20230815-p5dwp1> (04.09.2023).

[IEA 2021]: The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris: International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (12.09.2023).

[Imerys 2022]: By launching a project to mine lithium in France, Imerys is playing its part in the energy transition. <https://www.imerys.com/news/launching-project-mine-lithium-france-imerys-playing-itspart-energy-transition> (14.09.2023).

[Innovation News 2023]: Inside Canada's first-ever Rare Earth Processing Facility, Innovation News Network, 11. August 2023, <https://www.innovationnewsnetwork.com/inside-canadas-first-ever-rare-earth-processing-facility/35978/> (04.09.2023).

[IPCEI Batteries 2023]: Build-up of the battery industry -status quo and challenges Q2 – 2023. <https://www.ipcei-batteries.eu/accompanying-research/market-updates> (14.09.2023).

[JRC 2020]: Carrara, S.; Alves Dias, P.; Plazzotta, B.; Pavel C. (2020): Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system. Joint Research Centre. JRC119941. <http://dx.doi.org/10.2760/160859> (11.09.2023).

[Keliber 2023]: Lithium project, Sibanye-Stillwater.

<https://www.sibanyestillwater.com/business/europe/keliber/lithium-project/> (14.09.2023).

[Kiemel et al. 2021]: Kiemel, S. et al. (2021). Critical materials for water electrolyzers at the example of the energy transition in Germany. International Journal of Energy Research, 45(7), 9914-9935.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.6487> (14.09.2023).

[KoaV 2021] SPD; Bündnis 90/Die Grünen; FDP (2021). Mehr Fortschritt wagen, Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 zwischen SPD, Bündnis 90/ Die Grünen und FDP.

[Kühnel et al. 2018] Kühnel, S.; Hacker, F.; Görz, W. (2018). Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr, Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich. Erster Teilbericht des Forschungsvorhabens „StratON - Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge“. Öko-Institut. Freiburg, Berlin, Darmstadt.

[Moreno 2023]: Moreno, L. (2023). North America's bid to onshore rare earth supply, in pv magazine, 7. März 2023, <https://www.pv-magazine.com/2023/03/07/north-americas-bid-to-onshore-rare-earth-supply/> (04.09.2023).

[Neomaterials 2023]: neomaterials. (2023). Neo Launches Construction of Permanent Rare Earth Magnet Facility; Europe's First Mine-to-Magnets Supply Chain, 7. Juli 2023,

<https://www.neomaterials.com/neo-launches-construction-of-re-magnet-manufacturing-plant/>

(04.09.2023).

[Nordelöf et al. 2017]: Nordelöf, A. et al. (2017). A Scalable Life Cycle Inventory of an Electrical Automotive Traction Machine – Technical and Methodological Description, version 1.01. Report No. 2016:4 (1.01) model file: Nordelöf (2017). Von chalmers.se:

http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/DataReferences/Scalable_PMSM_LCI_Model_v1.01.xlsm

(30.08.2023).

[NOW 2020]: Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (2020): Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf.

[NOW 2022]: (2022): Führen, D.; Graw, M.; Kröll, L. (INC Invention Center); Ilsemann, J., Robinius, M.; Wienert, P. (umlaut); Aretz, M.; Janssen, H.; Kersting, M.; Müller, C. (Fraunhofer IPT): Wertschöpfungskette Brennstoffzelle – Metastudie, Hrsg. NOW GmbH.

[Packroff 2023]: Packroff, J. [(2030): Kritische Rohstoffe: EU-Staaten wollen mehr heimische Verarbeitung. EURACTIV 30.06.2023. <https://www.euractiv.de/section/finanzen-und-wirtschaft/news/kritische-rohstoffe-eu-staaten-wollen-mehr-heimische-verarbeitung/> (14.09.2023).

[Peter et al. 2022]: Peter, M. et al. (2022): Volkswirtschaftliche Bedeutung und Entwicklung von Batterieproduktion und -recycling in Deutschland, KSVE20302050, INFRAS in Kooperation mit Öko-Institut e.V. im Auftrag des BMWK, 16. August 2022.

[Repenning et al. 2022] Repenning, J. et al. (2022): Projektionsbericht 2021 für Deutschland. Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES GmbH, Thünen-Institut.

[Savannah resources 2023]: Barroso Lithium Project, Portugal – The most significant conventional lithium project in Europe. <https://www.savannahresources.com/project/barroso-lithium-project-portugal/> (14.09.2023).

[Schade et al. 2018] Schade, W.; Perez, E.; Berthold D.; Wagner, U.; Krail, M.; Waßmuth, V. (2018): Gestaltung des neuen Referenzszenarios zur Nutzung in der MKS 2017+, Arbeitspapier im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Karlsruhe.

[SKN & Agora 2021]: Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. https://www.stiftung-klima.de/app/uploads/2023/08/Klimaneutrales_Deutschland_2045_Langfassung.pdf (06.09.2023).

[SKN 2023]: Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2023): Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045, Studie im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität: <https://www.stiftung-klima.de/de/studie/> (06.09.2023).

[Sobol 2022]: Sobol, O. (2022). Materialeigenschaften und Kompatibilität für Wasserstofftechnologien, BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. <https://www.bam.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Energie/Wasserstoff/wasserstoff-materialeigenschaften-kompatibilitaet.html> (11.09.2023).

[Sojka et al 2023]: Sojka, R. et al (2023). MERCATOR „Material Effizientes Recycling für die Circular Economy von Automobilspeichern durch Technologie Ohne Reststoffe“. Accurec Recycling GmbH, IME der RWTH Aachen, CTG GmbH, UVR-FIA GmbH, Öko-Institut e.V., Juni 2023, mit Förderung durch das BMWK (FKZ 16EM4007).

[Solarserver 2023]: Europas PV-Produzenten: Maßnahmen gegen Chinas Billigimporte, Solarthemen Media GmbH, 11.09.2023. <https://www.solarserver.de/2023/09/11/europas-pv-produzenten-massnahmen-gegen-chinas-billigimporte/> (13.09.2023).

[Sphera/Fraunhofer IBP 2021]: Hengstler, J.; Russ, M.; Stoffregen, A.; Hendrich, A.; Weidner, S. (Sphera Solutions GmbH) und Held, M.; Briem, A.-K. (Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP) (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen; Abschlussbericht. CLIMATE CHANGE 35/2021, Fkz. 37EV 16 119 0 im Auftrag des Umweltbundesamtes (11.09.2023)

[Stockhead 2021]: Infinity takes San Jose lithium plan underground as EU demand grows – Mining News. <https://stockhead.com.au/resources/infinity-takes-san-jose-lithium-plan-underground-as-eu-demandgrows/> (14.09.2023).

[UBA 2023] Umweltbundesamt 22.03.2023:
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch> (30.10.2023).

[UNEP 2011]: Graedel, T.E; Allwood, J; Birat, J-P; Reck, B.K; Sibley, S.F; Sonnemann, G; Buchert, M; Hagelüken, C. (2011) Recycling Rates of Metals – A Status Report. A Report of the Working Group on Global Metal Flows to the International Resource Panel: <https://www.resourcepanel.org/reports/recycling-rates-metals> (04.09.2023).

[Urban 2023]: Urban, D. (2023): Wasserstoff in Eisen und Stahl. Fraunhofer IWM. <https://www.iwm.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/werkstoffbewertung-lebensdauerkonzepte/materialmodellierung/wasserstoff-in-eisen-und-stahl.html> (11.09.2023).

[USGS 2010]: U.S. Geological Survey. (2010). Mineral Commodity Summaries. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/mineral-pubs/mcs/mcs2010.pdf> (26.10.2023).

[USGS 2013]: U.S. Geological Survey. (2023). Mineral Commodity Summaries. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mineral2013> (30.08.2023).

[USGS 2023]: U.S. Geological Survey. (2023). Mineral Commodity Summaries. <https://doi.org/10.3133/mcs2023> (30.08.2023).

[van Nielen 2023]: van Nielen, S. et al. (2023). Journal of Cleaner Production - Towards neodymium recycling: Analysis of the availability and recyclability of European waste flows.

[Vulcan Energy 2023]: Zero Carbon Lithium™ Projekt. Vulcan Energy 2023. <https://v-er.eu/de/zero-carbon-lithium-de/> (14.09.2023).

https://research.tudelft.nl/files/148277200/1_s2.0_S0959652623004109_main.pdf (04.09.2023).

[Zinnwald 2023]: Advanced, integrated, low CAPEX, high margin, lithium project. Zinnwald Lithium 2023. <https://www.zinnwaldlithium.com/> (14.09.2023).

7 Anhänge

7.1 Materialzusammensetzung der EE-Anlagen

Tabelle 7-1: Ausgewählte Materialien in PV-Anlagen

PV-Zelltyp	Metall	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040
Kristallines Silizium	Kupfer (Anlage)	t/GW	4.600	4.600	4.600	4.600	4.600
	Silizium	t/GW	3.700	2.850	2.000	1.667	1.333
	Silber	t/GW	20	15.5	11	9	7
Cadmium-Tellurid	Kupfer (Anlage)	t/GW	4.600	4.600	4.600	4.600	4.600
	Cadmium	t/GW	85	72.5	60	55	50
	Tellur	t/GW	95	82.5	70	62.5	55
Kupfer-Indium-Gallium-Selenid	Kupfer (Anlage)	t/GW	4.600	4.600	4.600	4.600	4.600
	Kupfer (Zelle)	t/GW	24	20.75	17.5	16.5	15.5
	Gallium	t/GW	7	5.75	4.5	3.875	3.25
Gallium-Arsenid	Kupfer (Anlage)	t/GW	4.600	4.600	4.600	4.600	4.600
	Gallium	t/GW	23	23	23	23	23

Quelle: [SKN 2023] und [Betz et al. 2021] basierend auf [JRC 2020] HDS, mit Ausnahme von Si basierend auf [JRC 2020], LDS, s. [SKN 2023]; eigene Interpolation auf Zieljahr 2040.

Tabelle 7-2: Ausgewählte Materialien in Windkraftanlagen (WKA)

WKA-Typ	Metall	Einheit	Wert
Asynchrongeneratoren (mit Getriebe)	Kupfer	t/GW	1.400
	Neodym	t/GW	12
	Praseodym	t/GW	0
	Dysprosium	t/GW	2
	Terbium	t/GW	0
Permanterregte Synchrongeneratoren (mit Getriebe)	Kupfer	t/GW	950
	Neodym	t/GW	51
	Praseodym	t/GW	4
	Dysprosium	t/GW	6
	Terbium	t/GW	1
Permanterregte Synchrongeneratoren (getriebelos)	Kupfer	t/GW	3.000
	Neodym	t/GW	180
	Praseodym	t/GW	35
	Dysprosium	t/GW	17
	Terbium	t/GW	7
Fremderregte Synchrongeneratoren (getriebelos)	Kupfer	t/GW	5.000
	Neodym	t/GW	28
	Praseodym	t/GW	9
	Dysprosium	t/GW	6
	Terbium	t/GW	1

Quelle: [JRC 2020]