



Ostfalia

Hochschule für angewandte Wissenschaften

Fakultät Maschinenbau

Institut für Produktionstechnik

Bachelorarbeit

Einfluss der E-Mobilität auf den Bedarf und die Ressourcenverfügbarkeit von Lithium

Erstprüfer:	Prof. Dr. rer.pol. Tobias Frenzel
Zweitprüfer:	Dipl.-Kffr. M.A. Inga Poll
Ort:	Wolfenbüttel
Datum:	28. Februar 2024
Durchführung:	Lange, Julia
Matrikel-Nr.:	70469054

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen verwendet habe.

Wolfenbüttel, den 28.02.2024

Julia Lange

Erklärung zum Umgang mit gendersensibler Sprache

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Bachelorarbeit bewusst auf genderspezifische Sprache verzichtet. Es wird ausschließlich der generische Maskulin verwendet. Alle Formulierungen sollen gleichermaßen alle Geschlechter ansprechen.

Wolfenbüttel, den 28.02.2024

Julia Lange

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	1
2 Theoretischer Hintergrund	3
2.1 E-Mobilität und Marktlage.....	3
2.2 Eigenschaften von Lithium und allgemeine Verwendungszwecke	4
2.3 Wertschöpfungskette einer Lithium-Ionen-Batterie für E-Pkw	6
2.3.1 Abbaumethoden und Lithiumaufbereitung	6
2.3.2 Zielsetzungen bei der Rohstoffbeschaffung von Lithium	9
2.3.3 Aufbau und Funktionsweise der Lithium-Ionen-Batterie in E-Pkw	11
2.3.4 End of Life und Recycling	14
2.4 Prognose- und Szenariotechnik	16
3 Prognose des Lithiumbedarfs für E-Pkw bis 2035	19
3.1 Vorgehensweise zur Ermittlung des Bedarfs.....	19
3.2 Szenarien der Lithiumnachfrage.....	20
3.3 Lithiumverbrauch pro E-Pkw	21
3.3.1 Spezifisches Lithiumgewicht in Abhängigkeit der Kapazität	21
3.3.2 Durchschnittliche Batteriekapazität eines E-Pkw.....	29
3.3.3 Zusätzlicher Bedarf durch Ausschuss bei der Produktion	32
3.4 Entwicklung der Absatzzahlen von E-PKW	35
3.5 Zusammenführung des prognostizierten Lithiumbedarfs	41
4 Ressourcenverfügbarkeit von Lithium bis 2035	45
4.1 Aktuelle Lithiumressourcen und -reserven	45
4.2 Primärversorgung durch Lithiumabbau	49
4.3 Sekundärversorgung durch Recycling.....	54
4.4 Prognose der Lithiumverfügbarkeit bis 2035	58
5 Gegenüberstellung der Analyseergebnisse	61
6 Handlungsempfehlungen für die Beschaffung von Lithium	64
6.1 Sourcingstrategien.....	64
6.2 Kriterien für die Lieferantenwahl.....	66
6.3 Allgemeine Handlungsempfehlung	70
6.4 Kritische Diskussion	72
7 Fazit und Ausblick	74
8 Literaturverzeichnis	76
9 Anhang	88

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Anteilige Verwendungszwecke von Lithium (Stand 2022).....	5
Abb. 2.2: Wertschöpfungskette von Lithium für eine Lithium-Ionen-Batterie im E-Pkw.....	6
Abb. 2.3: Aufbau und Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Batterie.....	12
Abb. 2.4: Batteriesystem der Elektroplattform MEB in den Volkswagen ID.Modellen.....	13
Abb. 3.1: Kastendiagramm mit Spannweite des spez. Lithiumgewichts [kg/kWh].....	25
Abb. 3.2: Gegenüberstellung von Absatzprognosen von E-Pkw weltweit.....	35
Abb. 3.3: Prognose von Absatzszenarien.....	37
Abb. 3.4: Prognose des Lithiumbedarfs in Abhängigkeit der Szenarien.....	43
Abb. 4.1: Weltkarte mit Darstellung der Lithiumressourcen.....	46
Abb. 4.2: TOP 5 Länder mit den größten Lithiumreserven (Stand 2022).....	48
Abb. 4.3: TOP 3 Länder mit höchster Lithiumproduktion im Jahr 2022 und 2023.....	49
Abb. 4.4: Kurvenverlauf der Lithiumproduktion von 2010 bis 2035.....	50
Abb. 4.5: Recyclingpotenziale in Abhängigkeit der Szenarien.....	56
Abb. 4.6: Verhältnis der globalen Ressourcen, Reserven und der jährlichen Produktion von Lithium (Stand 2022).....	58
Abb. 4.7: Prognose der Primär- und Sekundärproduktion von Lithium.....	60
Abb. 5.1: Gegenüberstellung des Lithiumbedarfs und der Ressourcenverfügbarkeit.....	61

Abkürzungsverzeichnis

ABB	Asea Brown Boveri (<i>Unternehmen</i>)
BEV	Battery-Electric-Vehicle
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BYD	Build Your Dreams (<i>chinesischer Automobilhersteller</i>)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DERA	Deutsche Rohstoffagentur
DFS	Definitive Feasibility Study (dt.: Endgültige Machbarkeitsstudie)
EoL	End of Life
ESG	Environmental-Social-Governance
EU	Europäische Union
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicles
FS	Feasibility Study (dt.: Machbarkeitsstudie)
Fraunhofer ISI	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH
HE-NMC	Hochenergie-Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid
HEV	Hybrid-Electric-Vehicle
IRENA	International Renewable Energy Agency
JAC	Anhui Jianghuai Automobile Group Corporation (<i>chinesischer Automobilhersteller</i>)
JMEV	Jiangling Motors EV (<i>chinesischer Automobilhersteller</i>)
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LCE	lithium carbonate equivalent (dt.: Lithiumkarbonat-Äquivalent)
LFP	Lithium-Eisenphosphat (<i>Batterie</i>)
LIB	Lithium-Ionen-Batterie

MEB	Modularer E-Antriebsbaukasten
MEK	Materialeinzelkosten
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (<i>Batterie</i>)
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (<i>Batterie</i>)
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
OEM	Original Equipment Manufacturer (dt.: Erstausrüster bzw. in Bezug auf Automobilbranche: Fahrzeughersteller)
PFS	Pre-Feasibility Study (dt.: Vor-Machbarkeitsstudie)
PHEV	Plug-In-Hybrid-Electric-Vehicle
SIB	Sodium-Ion-Battery (dt.: Natrium-Ionen-Batterien)
SQM	Sociedad Quimica y Minera de Chile SA
SSB	Solid-State-Battery (dt.: Feststoffbatterie)
USA	United States of America (dt.: Vereinigte Staaten von Amerika)
USGS	U.S. Geological Survey
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Die weltweiten Umweltbelastungen steigen stetig an und gefährden die Lebensräume der Erde. Insbesondere die Reduktion von Kohlenstoffdioxid (CO₂-Emissionen), die u.a. auch durch den Verkehrssektor verursacht werden, rücken zunehmend im Rahmen von Klimaschutzmaßnahmen weltweit in den Fokus. Infolgedessen streben Regierungen und Automobilhersteller eine Mobilitätswende an. Anstelle von Verbrennungsmotoren sollen langfristig klimaneutrale Antriebstechnologien eingesetzt werden. Aktuell bieten E-Fahrzeuge das höchste Potenzial zur Einhaltung der Umweltvorgaben und werden bereits in hoher Variantenvielfalt auf dem Markt angeboten. In den kommenden Jahren wird hauptsächlich in China, den Vereinigten Staaten von Amerika (USA) sowie Europa ein Hochlauf der E-Mobilität erwartet. Nach derzeitigem Stand wird ab dem Jahr 2035 sogar ein Verbot von Verbrenner-Neuzulassungen in der *Europäischen Union* (EU) und einigen US-Bundesstaaten forciert. (vgl. BMUV20) (vgl. KOS23) (vgl. LEI23) (vgl. KUT23)

Jedoch ergeben sich aus dem Technologiewechsel neue Herausforderungen für die Automobilindustrie, vor allem in Bezug auf die Transformation von Produkt-Know-how und etablierten Unternehmensprozessen. Darunter fallen Problemstellungen bei der Beschaffung von Rohstoffen, wovon insbesondere die Batterie, als Kernkomponente eines E-Autos betroffen ist. Neben vielen weiteren Materialien wird für deren Herstellung Lithium verwendet. Das Material ist entscheidend für die Umsetzung der Stromspeicherfunktion innerhalb der Batterie. Der Weltmarkt muss sich daher sowohl auf eine wachsende Nachfrage der Automobilbranche als auch anderer Industriezweige einstellen. Die EU sowie die *United States Geological Survey* (USGS) stufen Lithium daher als kritischen und strategisch wichtigen Rohstoff ein. Das bedeutet, dass die Bedarfsdeckung als gefährdet bewertet wird, aber zeitgleich eine sichere Versorgung des Markts von hoher Relevanz ist. Aus diesem Grund sollten Automobil- und Batteriehersteller die globale Rohstoffsituation und deren potenzielle Entwicklung intensiv beobachten, um die eigene Versorgung sicherzustellen. (vgl. SCH20) (vgl. GRV23) (vgl. USGS24)

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Vor diesem Hintergrund setzt sich die vorliegende Arbeit mit dem Thema *Einfluss der E-Mobilität auf den Bedarf und die Ressourcenverfügbarkeit von Lithium* auseinander. Die Untersuchung erfolgt auf globaler Ebene und beschränkt sich auf die Nachfrage des Segments der E-Pkw. Der Einsatz von lithiumhaltigen Batterien für den ÖPNV oder Güterverkehr und weitere Verwendungszwecke sind nicht Gegenstand dieser Ausarbeitung. Die Zielsetzung

fokussiert sich auf die zentrale Forschungsfrage: Kann der im Rahmen der E-Mobilität entstehende Lithiumbedarf bis 2035 gedeckt werden?

Davon ausgehend werden die folgenden Problemstellungen systematisch analysiert:

1. Warum ist Lithium ein relevanter Rohstoff für E-Autos?
2. Wie entwickelt sich der weltweite Lithiumbedarf für E-Pkw bis 2035?
3. Welche Lithiumressourcen stehen bis 2035 zur Verfügung?
4. Welches Verhältnis entsteht zwischen dem Bedarf und der Verfügbarkeit bis 2035?
5. Welche Handlungsempfehlungen können aus den Analyseergebnissen für die Beschaffung von Lithium abgeleitet werden?

Zur Zielerreichung ist diese Arbeit in sieben aufeinander aufbauende Kapitel untergliedert. Im direkten Anschluss an die Einleitung werden im zweiten Kapitel theoretische Grundlagen behandelt, die über den Einsatz und die Wertschöpfung von Lithium im Rahmen der E-Mobilität aufklären. Zudem erfolgt eine Vorstellung von Prognose- und Szenariotechniken, um auf die angewandte Methodik im praktischen Hauptteil der Arbeit vorzubereiten.

Das dritte Kapitel konzentriert sich auf die systematische Analyse des zukünftigen, weltweiten Lithiumbedarfs für E-Pkw. Dafür werden relevante Einflussfaktoren identifiziert und miteinander in Beziehung gesetzt. In Abhängigkeit von verschiedenen Szenarien werden aus den Ergebnissen mögliche Bedarfsentwicklungen prognostiziert. Im anschließenden vierten Kapitel wird eine Untersuchung der Ressourcenverfügbarkeit von Lithium auf globaler Ebene durchgeführt. Diese betrachtet die bekannten Vorkommen und Abbauaktivitäten sowie eine Prognose des künftigen Lithiumangebots einschließlich potenzieller Recyclingquellen.

Im fünften Kapitel werden der ermittelte Bedarf und die Verfügbarkeit im zeitlichen Verlauf bis zum Zieljahr 2035 gegenübergestellt. Aus diesem Verhältnis wird die zu erwartende Entwicklung ausgewertet, um die langfristige Versorgungssituation zu interpretieren. Ausgehend von den Ergebnissen werden im sechsten Kapitel Handlungsempfehlungen für die strategische und operative Beschaffung von Lithium an Automobil- und Batteriehersteller adressiert. Dabei liegt der Fokus auf der Sicherung der Lithiumversorgung unter Berücksichtigung der Anforderungen an einen potenziellen Lieferanten.

Die Arbeit schließt mit einer kritischen Diskussion und einem Ausblick für weiterführende Forschung sowie einem Fazit ab.

2 Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel wird Grundlagenwissen behandelt, welches für das Verständnis der nachfolgenden Untersuchungen vorausgesetzt wird. Ausgehend von der Bedeutung der E-Mobilität, wird die aktuelle Marktlage dargestellt. Zudem werden die Eigenschaften und allgemeinen Verwendungszwecke von Lithium thematisiert. Anschließend wird dessen Wertschöpfungskette für die Nutzung von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in E-Fahrzeugen beschrieben. Ausgehend von Abbaumethoden und den Anforderungen an den Rohstoff Lithium der nachfragenden Unternehmen wird dabei auf den Aufbau und die Funktionsweise der Batterie sowie das Recycling eingegangen. Abschließend erfolgt eine theoretische Vorstellung von Prognose- und Szenariotechniken.

2.1 E-Mobilität und Marktlage

Der Begriff E-Mobilität umfasst nach der Definition des *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz* (BMWK) alle Fahrzeuge, die mithilfe eines E-Motors angetrieben werden. Während konventionelle Pkw mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet sind und Kraftstoffe wie Benzin oder Diesel benötigen, werden E-Fahrzeuge mit elektrischem Strom betrieben. Um die Energie während der Fahrt zur Verfügung zu stellen, werden Batterien als Speicher eingesetzt. Dadurch werden im Betrieb keine CO₂-Emissionen freigesetzt und die Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen¹ reduziert. Infolgedessen trägt die E-Mobilität dazu bei, den Verkehrssektor nachhaltig zu dekarbonisieren. Neben den rein elektrischen *Battery-Electric-Vehicles* (BEV, dt.: batterieelektrisches Fahrzeug) fallen *Plug-In-Hybrid-Electric-Vehicles* (PHEV) sowie *Hybrid-Electric-Vehicles* (HEV) und *Fuel Cell Electric Vehicles* (FCEV) unter die Kategorie eines E-Autos. Die HEV sind wie die PHEV mit einem kombinierten Antrieb ausgestattet, sodass der elektrische den konventionellen Motor ergänzt und die FCEV werden über eine Brennstoffzelle versorgt. Lediglich die BEV und PHEV können von außen an die Stromversorgung angeschlossen werden und besitzen zu diesem Zweck Stromspeicher in Form von Batterien. Im Bereich der E-Pkw sind diese aufgrund ihrer Größe vor allem bei den BEV und PHEV für den Lithiumbedarf relevant (vgl. VDMA23, S. 11). Daher werden in der folgenden Untersuchung HEV und FCEV nicht berücksichtigt. (vgl. BMWK24a) (vgl. MEY22) (vgl. MAE22)

Die E-Mobilität stellt in der Vergangenheit im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen einen Nischenmarkt dar. Aufgrund der Vorgaben zum Erreichen der Klimaschutzziele, vollzieht sich aktuell ein Wandel im Produktportfolio der Automobilhersteller. In den kommenden Jahren ist daher ein Wachstum der globalen Absatzentwicklung in der E-Mobilität zu erwarten. Jedoch

¹ **Fossile Kraftstoffe:** Die Entstehung geht auf einen Millionen Jahre andauernden Alterungsprozess von abgestorbenen, organischen Substanzen zurück. Bei der Verbrennung wird das gespeicherte CO₂ wieder freigesetzt. (vgl. JOC24)

vollzieht sich der Wandel in den einzelnen Weltregionen stark heterogen und konzentriert sich zu 95 % auf die chinesischen, europäischen und US-amerikanischen Märkte. Insbesondere China ist mit einem Anteil von ca. 57 % maßgeblich für den Hochlauf der E-Mobilität, während auf Europa und die USA etwas mehr als ein Drittel der Verkäufe entfallen. Die Defizite der übrigen Staaten kann hauptsächlich auf fehlende staatliche und wirtschaftliche Unterstützung, das Nichtvorhandensein von Ladeinfrastruktur sowie geringe finanzielle Mittel bei den Kunden zurückgeführt werden. Die wichtigsten Anbieter der Fahrzeuge sind im Jahr 2023 die Automobilhersteller *Tesla* (USA), *Build Your Dreams* (BYD, China) sowie die *Volkswagen Group* (Deutschland). (vgl. STA23a) (vgl. NED24)

2.2 Eigenschaften von Lithium und allgemeine Verwendungszwecke

Vor dem Hintergrund der E-Mobilität sind die Charakteristika und Besonderheiten des hier konzentrierten Rohstoffs Lithium wesentlich, um die Bedeutung des Bedarfs nachzuvollziehen. Die Benennung leitet sich aus dem griechischen Begriff *lithos* (dt.: Stein) ab, da die erste Entdeckung im Jahr 1817 auf Gesteinsvorkommen zurückzuführen ist. Das Element ist weiß-gräulich gefärbt und glänzt silbrig. Wegen der hohen wirtschaftlichen Bedeutung wird es daher auch als „weißes Gold“ bezeichnet. Lithium ist weich genug, dass es mithilfe eines Messers problemlos durchtrennt werden könnte. Der Aggregatzustand² ist fest, aber es handelt es sich um ein Metall niedriger Härte. (vgl. FEL17, S. 254 ff.) (vgl. CHE24a)

Aus dem Aufbau des Lithiumatoms können chemische und physikalische Eigenschaften abgeleitet werden. Daher werden diese kurz vorgestellt. Im *Periodensystem der Elemente* wird Lithium unter der Abkürzung „Li“ geführt und gehört der *Hauptgruppe I* der Alkalimetalle an. Dort wird es der zweiten Periode zugeordnet und weist die *Ordnungszahl 3* auf. Das bedeutet, dass ein Lithiumatom insgesamt über drei Elektronen verfügt, wovon eines in der äußeren Schale das Valenzelektron bildet. Infolgedessen wird eine Abspaltung dieses Elektrons angestrebt, um Edelgaskonfiguration³ zu erreichen. Aus dieser Eigenschaft erklärt sich, dass Lithium sehr reaktionsfreudig ist und natürlicherweise immer eine Verbindung mit weiteren Elementen eingeht. Die Reaktivität führt bereits aufgrund der Feuchtigkeit bei Hautkontakt zu gesundheitsgefährdenden Verätzungen. Zudem kann das Valenzelektron durch die niedrige Elektronegativität leicht aus der Atomhülle gelöst werden. Bei einer freien Bewegung des Elektrons entsteht daher eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit. In diesem Fall wird aus dem Lithiumatom ein positiv geladenes Li⁺-Ion und ein separates, negativ geladenes Elektron e⁻.

² **Aggregatzustand:** unterscheidet, ob ein Element in fester, flüssiger oder gasförmiger Form vorliegt (vgl. FEL17, S. 67 ff.).

³ **Edelgaskonfiguration:** beschreibt das Streben der Atome, die äußere Elektronenschale der Valenzelektronen vollständig zu füllen, indem Verbindungen mit anderen Elementen eingegangen werden (vgl. FEL17, S. 42 ff.).

Des Weiteren besteht der Atomkern aus drei Protonen und vier Neutronen. Somit beträgt die mittlere Atommasse⁴ von Lithium 6,94 u. Damit ist Lithium das leichteste Metall, das auf der Erde vorkommt. In Bezug auf das Gewicht in Abhängigkeit des Volumens ist die Dichte von Lithium mit 0,53 g/cm³ ebenfalls im Vergleich zu anderen festen Elementen am niedrigsten – so niedrig, dass es sogar auf der Wasseroberfläche schwimmt. (vgl. FEL17, S. 31 ff.) (vgl. CHE24a)

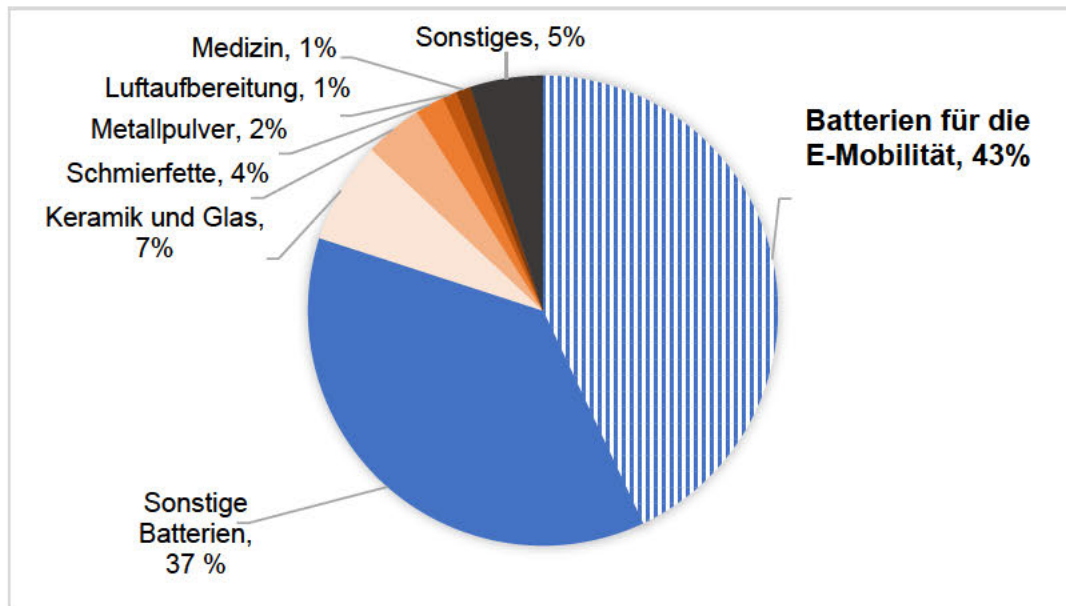


Abb. 2.1: Anteilige Verwendungszwecke von Lithium (Stand 2022) (vgl. USGS23, S. 1) (vgl. NOW23)

Aufgrund der beschriebenen Eigenschaften kommt Lithium für verschiedene Anwendungen zum Einsatz (siehe Abb. 2.1). Zum Beispiel für Medikamente zur Behandlung von psychischen Erkrankungen (1 %), Luftaufbereitung (1 %), Metallpulver (2 %), Schmierfette (4 %) oder die Keramik- und Glasherstellung (7%) (vgl. FEL17, S. 260 f.). Die größte Bedeutung kommt jedoch aktuell mit ca. 80 % der Verwendung für wiederaufladbare Batterien zu. Dabei tragen insbesondere LIB für den Einsatz in E-Fahrzeugen mit 43 % den größten Nutzungsanteil (vgl. NOW23). Die restlichen 37 % teilen sich in erster Linie absteigend auf folgende Einsatzgebiete auf: (vgl. USGS23, S. 2) (vgl. DERA23, S. 57 ff.)

- stationäre Speicher für regenerative Stromerzeugung (u.a. Solaranlagen)
- E-Roller
- Werkzeuge (u.a. Akkuschauber, Gartengeräte)
- Konsumelektronik (u.a. Smartphones, Notebooks, Tablets)

Die Verteilung spiegelt den aktuellen Stand aus dem Jahr 2022 wider. In Zukunft kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil der Batterien für die E-Mobilität weiter steigen wird. Für

⁴ **Atommasse:** leitet sich aus der durchschnittlichen Summe der Protonen und Neutronen eines Elements ab, die jeweils eine Masse von 1 u ($1,66056 \cdot 10^{-27}$ kg) aufweisen (vgl. CHE24b).

das Jahr 2030 wird daher von der *Deutschen Rohstoffagentur* (DERA) prognostiziert, dass der Einsatz in E-Fahrzeugen für 61,5 % der Lithiumnachfrage verantwortlich ist. (vgl. DERA23, S. 57 ff.)

2.3 Wertschöpfungskette einer Lithium-Ionen-Batterie für E-Pkw

Da Lithium hauptsächlich für die Verwendung in LIB benötigt wird und davon wiederum die E-Mobilität den größten Anteil verantwortet, wird auf deren Wertschöpfungskette eingegangen. Dadurch werden Grundlagen für die nachfolgende Bedarfsanalyse sowie die Ressourcenverfügbarkeit gelegt.



Abb. 2.2: Wertschöpfungskette von Lithium für eine Lithium-Ionen-Batterie im E-Pkw (vgl. NPM19) (vgl. GIZ21, S. 63)

Die Abb. 2.2 skizziert vereinfacht die Wertschöpfungskette des Rohstoffs Lithium für den Verwendungszweck einer LIB im E-Pkw. Die relevanten Aspekte der dargestellten Schritte werden nachfolgend in diesem Unterkapitel beschrieben. Ausgehend von den gängigen Abbaumethoden und der Aufbereitung, wird das Lithium zur Produktionsstätte der beschaffenden Batterie- und Fahrzeugherstellern transportiert. Dabei müssen verschiedene Anforderungen erfüllt werden. Anschließend wird die LIB im Rahmen des Herstellungsprozesses in das E-Fahrzeug eingesetzt und für dessen Betrieb genutzt. Zum Abschluss wird das Lebensende des E-Autos, das sogenannte End of Life (EoL), erreicht. Die Batterie kann beim Erreichen dieses Zeitpunkts durch Recyclingverfahren in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden und das Lithium erneut für eine LIB-Produktion verwendet werden. (vgl. NPM19) (GIZ21, S. 63)

2.3.1 Abbaumethoden und Lithiumaufbereitung

Im ersten Schritt muss das Lithium als Rohstoff bereitgestellt werden. Das Element ist in der Natur niemals in reiner Form vorhanden, sondern immer gebunden. Daher ist der Abbau und die anschließende Extraktion ein aufwendiger Prozess. Lithium kommt in Gesteinen vor –

überwiegend in Spodumen⁵, Lepidolith⁶ oder Petalit⁷. Daher hat sich der Erzbergbau als wichtige Methode zur Gewinnung des Metalls insbesondere in Australien etabliert. Die Mine der Firma *Albemarle* in *Greenbushes* ist die produktionsstärkste Lithiumquelle der Welt (vgl. NEI23). Auf weitere relevante Regionen des Lithiumabbaus wird im Kapitel 4 detaillierter eingegangen. Die natürliche Konzentration des Lithiums ist mit maximal 6 % gering. Daher werden zunächst Gesteinsblöcke aus den Abbaugebieten gesprengt und mechanisch zerkleinert. Anschließend erfolgt ein chemischer Separationsprozess, der die Lithiumbestandteile von den übrigen Gesteinselementen isoliert. Bei diesem Verfahren ist aktuell in Bezug auf die Umweltauswirkungen festzustellen, dass je 1 t Lithium etwa 9 t CO₂ ausgestoßen wird. Außerdem entsteht beim metallischen Extraktionsprozess giftiger, mit Schwermetallen belasteter Schlamm. Die Entsorgung und Lagerung birgt daher immer das Risiko einer Freisetzung in der Natur. (vgl. THO23) (vgl. FEL17, S. 255) (vgl. FTZ23, S. 39 ff.)

Neben den Gesteinsvorkommen kann Lithium in Südamerika aus Salaren (dt.: Salzseen) gewonnen werden. Die *Salar de Atacama* des Betreibers *Sociedad Química y Minera de Chile SA* (SQM) ist die zweitgrößte Lithiumproduktionsstätte weltweit (vgl. NEI23). In der Region befindet sich lithiumhaltiges Salzwasser in den Böden, welches großflächig in künstlich angelegte Seen gepumpt wird. Mithilfe der starken Sonneneinwirkung verdunstet das Wasser zu 97 % fast vollständig. Dieser Prozess dauert in der Regel etwa acht Monate. In den übrigbleibenden Salzfeldern konzentrieren sich neben Lithium auch weitere Metalle die ursprünglich in der Sole vorhanden sind, sodass der Lithiumrückstand ähnlich wie bei den Gesteinen lediglich bei ca. 6 % liegt. Daher wird anschließend eine chemische Separation durchgeführt, um das Lithium zu extrahieren. Diese Methode ist besonders effizient, da in Südamerika das Salzwasser über den weltweit höchsten Lithiumanteil verfügt und das Klima (hohe Sonneneinwirkung und geringer Niederschlag) optimale Bedingungen für den Verdunstungsprozess bildet. Jedoch wirkt sich der hohe Wasserverbrauch auf die Lebensbedingungen der Menschen vor Ort aus. Denn Süßwasser kann in die abgepumpten unterirdischen Speicher nachlaufen und somit den Grundwasserpegel senken. Dadurch wird in der trockenen Region die Wasserknappheit für die Bevölkerung verstärkt, welche stark von landwirtschaftlichen Tätigkeiten abhängig ist. (vgl. FEL17, S. 256) (vgl. THP23, S. 16 ff.) (vgl. THO23) (vgl. FTZ23, S. 39 ff.)

⁵ **Spodumen:** weißlich-gelber mineralischer Kristall, der zu den Hauptquellen für den Lithiumabbau gehört (vgl. CHE24c).

⁶ **Lepidolith:** weißlich-rosafarbener mineralischer Kristall, der u.a. Lithiumanteile aufweist und daher eine weitere wichtige Quelle für die Lithiumgewinnung darstellt (vgl. UBR24).

⁷ **Petalit:** durchsichtig-rosafarbener mineralischer Kristall, der ebenfalls anteilige Lithiumverbindungen aufweist und abgebaut werden kann (vgl. CHE24d).

Abgesehen von diesen beiden hauptsächlich zur Anwendung kommenden Verfahren, werden aktuell weitere innovative Prozeduren zur Lithiumgewinnung entwickelt – zum Beispiel als Nebenprodukt von Geothermiekraftwerken. Diese Methode wird bereits am Oberrheingraben in Deutschland erprobt. Dabei wird Wasser aus ca. 3.000 m Tiefe aus dem Untergrund gefördert und zur regenerativen⁸ Strom- und Wärmeerzeugung genutzt. Da das hochgepumpte Wasser ähnlich wie bei den südamerikanischen Solen Lithiumanteile aufweist, soll das Energiekraftwerk parallel zur Herstellung des Metalls umgerüstet werden. Dazu werden Filteranlagen eingesetzt, die ausschließlich das Lithium extrahieren und die restlichen Elemente wieder in den Boden zurückführen. Derzeit läuft ein Pilotprojekt der Firma *Vulcan Energy* in dem bereits Lithium gefördert wird. Ab dem Jahr 2026 soll die Anlage im industriellen Maßstab große Mengen des Rohstoff zur Verfügung stellen können. Im Vergleich zu den Salaren und Erzbergwerken werden bei diesem Prozess durch die Rückführung deutlich geringere Wasserverbräuche verzeichnet. Aufgrund der Kombination aus Energieerzeugung und Rohstoffgewinnung ergibt sich eine verbesserte CO₂-Bilanz. Damit ist Geothermie unter dem Gesichtspunkt der Klimafreundlichkeit eine vielversprechende Alternative zu den gängigen Verfahren und soll insbesondere in Europa und Nordamerika umgesetzt werden. (vgl. THO23) (vgl. VCE24) (vgl. AZE22) (vgl. DERA23, S. 14)

Die vorgestellten Abbaumethoden unterscheiden sich nicht hinsichtlich der Qualitätsanforderungen von Lithium. Dieser Punkt ist relevant, da der Verwendungszweck von Lithium in der Batterie einen hohen Reinheitsgrad des Metalls voraussetzt, den sogenannten *Battery-Grade*⁹. Nach dem Abbau, muss das Lithium aufbereitet werden, um für die Produktion von Batteriezellen verwendet werden zu können. Im Anschluss an die Extraktion entsteht zunächst Lithiumkarbonat (Li₂CO₃) – eine Verbindung mit Kohlen- und Sauerstoff. Dieses kann dann vom Kohlenstoff getrennt und zum Teil zu Lithiumhydroxid (LiOH) weiterverarbeitet werden. Dieser Prozess erfolgt aktuell primär in China, wo etwa 60 % der weltweiten Lithiumverarbeitungsanlagen kontrolliert werden. Insbesondere die Aufbereitung aus den australischen Spodumen findet überwiegend dort statt. Perspektivisch soll dieser Prozess jedoch verstärkt direkt am Abbaustandort erfolgen, um Logistikwege zu verkürzen und die Wertschöpfung in den Ursprungsregionen zu belassen. Dies wird beispielsweise bereits in Chile umgesetzt. (vgl. IRE22, S. 27 ff.) (vgl. THO23) (GIZ21, S. 63) (vgl. FTZ23, S. 39 ff.) (vgl. DERA23, S. 13 ff.)

⁸ **Regenerativ:** Energieträger, die ausgeschöpft werden können ohne im Betrieb CO₂ freizusetzen und innerhalb kurzer Zeit wieder verfügbar sind. Zum Beispiel ist Sonnenstrahlung, Wind- oder Wasserkraft unerschöpflich, während u.a. fossile Ölquellen irreversibel aufgebraucht werden. (vgl. GUE24)

⁹ **Battery-Grade:** Besonders hochwertige Materialien, die aufgrund einer Reinheit von >95,5% und den chemischen Eigenschaften (u.a. hohe Energiedichte) einen hohen Standard für die Verwendung in Batterien gewährleisten. (vgl. NUM21) (vgl. ASS23)

In Form der beiden Verbindungen wird das Lithium für den Batterieeinsatz bereitgestellt. Aus diesem Grund werden Mengenangaben des Rohstoffes häufig in der Einheit *lithium carbonate equivalent* (LCE, dt.: Lithiumkarbonat-Äquivalent) gemacht. Da einige Quellen im Lauf dieser Arbeit auf LCE verweisen muss der Umrechnungsfaktor berücksichtigt werden, um die Masse in Lithium auszudrücken. Bei 1 kg LCE sind lediglich 0,188 kg Lithium enthalten (entspricht 18,8 % bzw. einer Division durch 5,3). (vgl. DERA23, S. 13)

2.3.2 Zielsetzungen bei der Rohstoffbeschaffung von Lithium

Nach der Rohstoffaufbereitung wird das Lithium auf dem Weltmarkt angeboten. Für die nachfragenden Batterie- und Automobilhersteller beginnt der Beschaffungsprozess. Dieser unternehmerische Aufgabenbereich stellt die Versorgung mit Gütern oder Dienstleistungen sicher – in diesem Fall also mit Lithium. Dabei werden verschiedene Zielsetzungen für die Lieferantenauswahl im Rahmen der Materialwirtschaft formuliert: (vgl. KRI24) (vgl. LAS22, S. 2)

„Die Aufgaben der Materialwirtschaft umfassen die Bereitstellung der für die Gütererzeugung benötigten Materialien in der richtigen **Menge** und richtigen **Qualität**, zur richtigen **Zeit**, am richtigen **Ort**, mit den richtigen **Informationen** sowie die Minimierung der mit der Materialbereitstellung anfallenden **Kosten**.“ (LAS22, S. 2)

Neben einem niedrigen Einkaufspreis sind demzufolge die qualitativen Eigenschaften der Güter sowie die termin- und mengenmäßige Versorgungssicherheit entscheidend. Darüber hinaus wird der Einhaltung sozialer und ökologischer Vorgaben, der sogenannten Environmental-Social-Governance (ESG-Ziele), eine zunehmende Bedeutung zugesprochen (vgl. HAB24). (vgl. ETT22) (vgl. ARN22, S. 1)

Eine Senkung des Beschaffungsaufwands wird angestrebt, da die Kosten einer Batterie im E-Pkw zu 72 % durch die Materialkomponenten getragen werden (vgl. THP23, S. 16) (vgl. PAVB21). Die Rohstoffpreise haben damit einen großen Einfluss auf die gesamten Produktkosten. Die davon anteiligen Lithiumkosten je E-Pkw sind abhängig vom der eingesetzten Masse pro Batterie. Diese wird nachfolgend in der Bedarfsanalyse im Kapitel 3 ermittelt. Ausgehend von diesen Ergebnissen wird nochmals auf die Kosten im Kapitel 6 im Zusammenhang mit der Schlussfolgerung von Handlungsempfehlungen für die Lithiumbeschaffung eingegangen. (vgl. ARN22, S. 6 ff.)

Dafür wird im Vorfeld geklärt welche Faktoren Einfluss auf den Lithiumpreis nehmen. Der Lithiumwert auf dem Markt wird in erster Linie durch das Verhältnis zwischen Angebot und Nachfrage bestimmt und ist damit hoch dynamisch. Demzufolge sind bei einer Engpassversorgung steigende Preise zu erwarten, während eine Überversorgung einen reduzierenden Effekt bewirkt. In der Vergangenheit ist der Lithiumpreis von 11.000 € pro t LCE im Jahr 2019 aufgrund des erhöhten Bedarfs stark angestiegen und beziffert sich im Jahr 2022

auf einem Höchststand von knapp 63.000 € je t LCE. Dies entspricht mehr als einer Verfünfachung innerhalb von drei Jahren. Jedoch ist der Preis seitdem rückläufig und beträgt im Jahr 2023 durchschnittlich 42.000 € je t LCE. Aktuell ist der Wert von Lithiumkarbonat auf ca. 12.000 € pro t LCE gesunken (Stand 01/2024) (vgl. STR24). Die weitere Preisentwicklung ist abhängig von der Entwicklung des Bedarfs und der Verfügbarkeit des Rohstoff. Aus den nachfolgenden Analyseergebnissen kann diesbezüglich eine grobe Tendenz abgeleitet werden (siehe Kapitel 5). (vgl. ETO24) (vgl. MRO23) (vgl. USGS24, S. 110) (vgl. BAL23) (vgl. SMD20, S. 11 ff.)

Darüber hinaus gibt es in Bezug auf Lithium Unterschiede bei den jeweiligen Kosten in Abhängigkeit der Herstellungsmethoden. Während der Erzbergbau ca. 3.700 € pro abgebauter t LCE kostet, ist der Aufwand bei der Gewinnung aus den Solen mit ca. 1.800 € bis 2.300 € je t LCE deutlich niedriger. Der zukünftig entstehende Nischenmarkt der Geothermie könnte sogar preislich noch weiter unterhalb liegen, da kein Abbau, sondern nur eine Filtration erforderlich ist und ein zunehmend steigender CO₂-Preis¹⁰ sich geringfügiger auf das Produkt auswirkt (siehe Kapitel 2.3.1). Die zusätzliche Einnahmequelle aus dem Energieverkauf sichert eine preisliche Überlegenheit gegenüber der Konkurrenz. Zusätzlich zu dem Herstellungsaufwand können internationale Lieferstandorte mit geringen Lohnkosten den Angebotspreis drücken. (vgl. HAR23) (vgl. ZAC17)

Außerdem müssen die beim Beschaffungsprozess entstehenden Logistikkosten berücksichtigt werden. Diese sind abhängig von dem Transportmittel sowie der Entfernung zwischen dem Lieferanten und dem beschaffenden Unternehmen. Je näher diese beieinander liegen, desto geringer sind der logistische Aufwand und damit auch die gesamten Beschaffungskosten sowie die Belastungen des CO₂-Preises. Lithium wird in der Regel per LKW von den Abbauminen zu den nächstliegenden Häfen transportiert und anschließend international verschifft. Des Weiteren müssen in Abhängigkeit der Länderherkunft des Handelspartner möglicherweise anfallende Zollkosten beachtet werden. (vgl. FOC23) (vgl. THP23, S. 18).

Zusätzlich zur Kostenoptimierung müssen bei der Lieferantenauswahl qualitative Anforderungen erfüllt werden. Bei Lithium handelt es sich um einen Rohstoff und kein komplexes Produkt. Wie bereits im Kapitel 2.3.1 beschrieben, gibt es kaum Unterschiede bei den gütemäßigen Eigenschaften in Bezug auf die Abbaumethoden und die Herkunft. Die Rohstoffreinheit ist hingegen vom chemischen Aufbereitungsprozess abhängig. Die

¹⁰ **CO₂-Preis:** Abgabe, die in Abhängigkeit der Höhe von verursachten CO₂-Emissionen fällig wird. Damit soll die Entscheidung für klimafreundliche Alternativen indirekt gefördert werden. Die Einführung eines CO₂-Preises ist bereits in einigen Ländern eingeführt. International wurden bereits 73 Initiativen eingeführt. (vgl. IST21) (vgl. WBG24)

nachfragenden Unternehmen sollten daher die Eignung des Lithiums für den Batterieeinsatz (Battery-Grade) vor der Lieferantenentscheidung prüfen. (vgl. ARN22, S. 6 ff.)

Ein weiterer wichtiger Faktor bei der Rohstoffbeschaffung stellt die Bewertung von geopolitischen Risiken dar. Darunter fallen unvorhergesehene politische Ereignisse und Krisen, die sich auf die Lieferfähigkeit und somit die Versorgungssicherheit auswirken können. Zum Beispiel beeinflusst aktuell der Ukraine-Krieg die Versorgung mit russischem Gas und der Angriff der Huthi-Rebellen im Roten Meer die logistischen Schiffrouten zwischen Asien und Europa (vgl. TAG23a) (vgl. DLF24). In der Folge kann es zu Lieferverzögerungen oder -ausfällen kommen und der Produktionsprozess gefährdet werden. Diese Entwicklungen sind schwer vorherzusehen und können potenziell immer bei internationalen Beziehungen entstehen. Das Risiko kann minimiert werden, je näher der Lieferant am Produktionsstandort sitzt oder je sicherer die politischen Verhältnisse im Land sind. (vgl. KRI24)

Zudem nimmt die Bedeutung von ESG-Zielen zu. Darunter fallen u.a. die Kontrolle von CO₂-Emissionen, des Wasserverbrauchs oder die Freisetzung von giftigen Stoffen. Ebenso ist die konsequente Einhaltung der Menschenrechte entlang der gesamten Lieferkette zu prüfen. Dies wird zum Beispiel über Lieferkettengesetze geregelt, die u.a. Kinder- und Zwangsarbeit verbieten. Neben europäischen Ländern haben die USA und Australien bereits feste Regeln entlang der Wertschöpfung eingeführt. Damit haften Unternehmen für die Arbeitsbedingungen von zugelieferter Ware. In Bezug auf Lithium müssen Automobilhersteller somit die Einhaltung der Menschenrechtsbestimmungen in den Rohstoffminen prüfen und kontrollieren. (vgl. IRE23) (vgl. ROE23)

Insgesamt können die hier thematisierten Zielvorgaben miteinander im Konflikt stehen und müssen jeweils gegeneinander abgewogen werden. Die beschaffenden Unternehmen können ein Bewertungssystem einführen, das den Erfüllungsgrad der Anforderungen abbildet. Damit können die potenziellen Lieferanten miteinander verglichen und die Entscheidungsfindung unterstützt werden. Anhand der Untersuchungsergebnisse werden nachfolgend im Kapitel 6 diesbezüglich Empfehlungen ausgesprochen. (vgl. ARN22, S. 6 ff.)

2.3.3 Aufbau und Funktionsweise der Lithium-Ionen-Batterie in E-Pkw

Nach der Lieferantwahl und Beschaffung des Lithiums sowie weiterer benötigter Rohstoffe und Komponenten kann die LIB produziert werden. Der Herstellungsprozess ist im Detail im Rahmen dieser Arbeit nicht von Relevanz. Jedoch lassen der Aufbau und die Funktionsweise der Batteriezelle Rückschlüsse auf die Bedeutung von Lithium für die E-Mobilität zu und werden dementsprechend untersucht.

Zum jetzigen Zeitpunkt sind LIB der Stand der Technik für die Anwendung in E-Fahrzeugen. Dies ist auf sehr gute Eigenschaften in Bezug auf die Leistung der Batterie zurückzuführen. Der Bestandteil Lithium trägt entscheidend dazu bei. Aufgrund des im Kapitel 2.2 beschriebenen geringen Gewichts sowie der niedrigsten Dichte unter den Metallen von lediglich $0,53 \text{ g/cm}^3$ kann die LIB im Vergleich zu ihrer Masse eine hohe Ladeleistung speichern. Diese Beziehung wird als Energiedichte definiert und beträgt zwischen 250 und 300 Wh/kg (vgl. TAG23b). Je höher dieser Referenzwert ausfällt, desto effizienter kann der für den Betrieb eines E-Pkw benötigte Strom gespeichert werden. Im Umkehrschluss müssten Batterien, die geringere Energiedichten aufweisen, größer dimensioniert werden, um dieselbe Leistung bereitstellen zu können. Der Bauraum innerhalb eines E-Fahrzeugs ist jedoch begrenzt. Infolgedessen werden optimierte Leistungsparameter angestrebt. Die maximal verfügbare Speicherfähigkeit wird als Batteriekapazität in kWh angegeben und bestimmt über die verfügbare Kilometerleistung eines E-Autos. Die Verwendung von Lithium trägt demnach entscheidend zu der Reichweite bei. (vgl. KUC22, S. 300) (vgl. DOP20, S. 142)

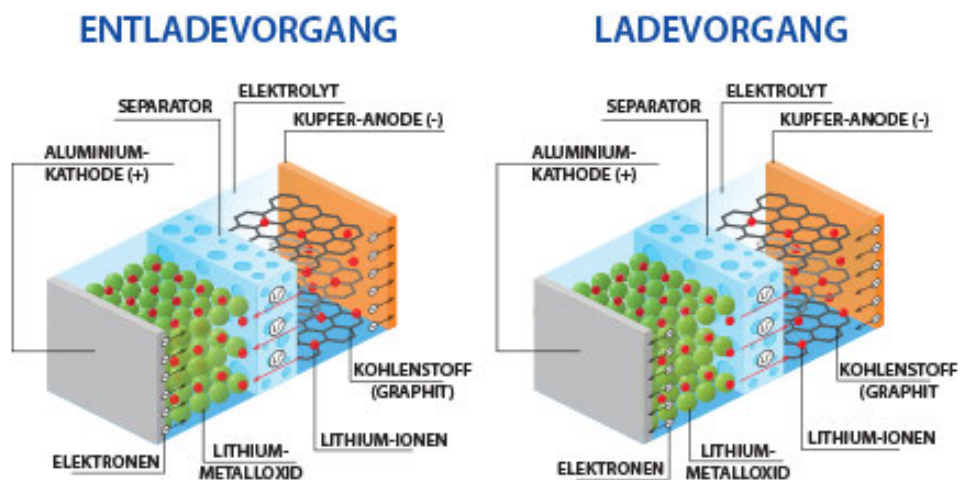


Abb. 2.3: Aufbau und Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Batterie (RON17)

Darüber hinaus übernimmt das Alkalimetall die Aufgabe des Austauschs der Ladungsträger beim Auf- und Entladen der Batterie und ermöglicht damit erst deren Zweckerfüllung (KHE24, S. 130). Um diesen Vorgang nachvollziehen zu können, wird anhand des Aufbaus, das Funktionsprinzip einer Batteriezelle vorgestellt (siehe Abb. 2.3). Diese besteht aus zwei an den Stromkreis angebotenen Elektroden – einer am Minus-Pol angeschlossenen **Anode** und einer **Kathode**, die mit dem Plus-Pol verbunden wird. Um den Stromfluss zu ermöglichen befindet sich an der Anode eine elektrisch leitende Kupferfolie und an der Kathode eine Aluminiumfolie. Das unedlere Kupfer besitzt weniger Valenzelektronen als das Aluminium. Daher können an der Anode Elektronen abgegeben (Oxidation) und an der Kathode aufgenommen (Reduktion) werden. Dieses Reaktionsstreben ist auf das elementare Streben nach Edelgaskonfiguration zurückzuführen (siehe Kapitel 2.2). Zusätzlich werden

Aktivmassen eingesetzt, die den Ionenaustausch unterstützen (vgl. BOT13, S. 5 f.). An der Kathode wird eine Kombination aus Lithium-Metalloxiden genutzt, welche die Li^+ -Ionen bereitstellen. Dafür findet das im Kapitel 2.3.1 beschriebene Lithiumkarbonat oder -hydroxid und verschiedene zusätzliche Materialverbindungen Anwendung (vgl. ALB24). Derzeit wird hauptsächlich Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC) appliziert. Aber auch Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA) oder Lithium-Eisenphosphate (LFP) eignen sich für die Kathodenaktivmassen. Auf der Anodenseite wird Graphit verwendet, dessen Kohlenstoffschichten über ein sehr gutes Aufnahmevermögen der Li^+ -Ionen verfügen. (vgl. KUC22, S. 302 ff.) (vgl. DOP20, S. 136 ff.)

Zusätzlich trennt ein **Separator** die Kathode von der Anode. Dieser besteht u.a. aus Polymer-Membranen, Keramik, Glasfaser oder Vlies und verhindert ein Durchdringen von Elektronen, um einen Kurzschluss und in der Folge einen Brand der Batterie zu verhindern. Die Li^+ -Ionen werden jedoch problemlos von dem Separator durchgelassen. Die Batteriezelle wird mit flüssigem **Elektrolyt** gefüllt, welches Lithium-Leitsalze beinhaltet, die den Transport der Li^+ -Ionen zwischen den Elektroden ermöglichen. Zusätzlich können Additive die Batterieeigenschaften optimieren, z.B. eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen und eine erhöhte Lebensdauer. Daher liegt in der Batterieforschung der Fokus auf der Wahl der Additive. (vgl. KUC22, S. 303) (vgl. DOP20, S. 146 ff.)

Diese vier wesentlichen Komponenten einer Batteriezelle (Anode, Kathode, Separator und Elektrolyt) werden derzeit nur in China, Japan und Südkorea vollständig innerhalb der Wertschöpfungskette produziert. Europa und die USA sind hingegen größtenteils auf Exporte angewiesen. Daher findet auch die Batteriezellfertigung zu 80 % überwiegend in China statt (vgl. THO23) (vgl. THP23, S. 19). (vgl. FRH18, S. 50)

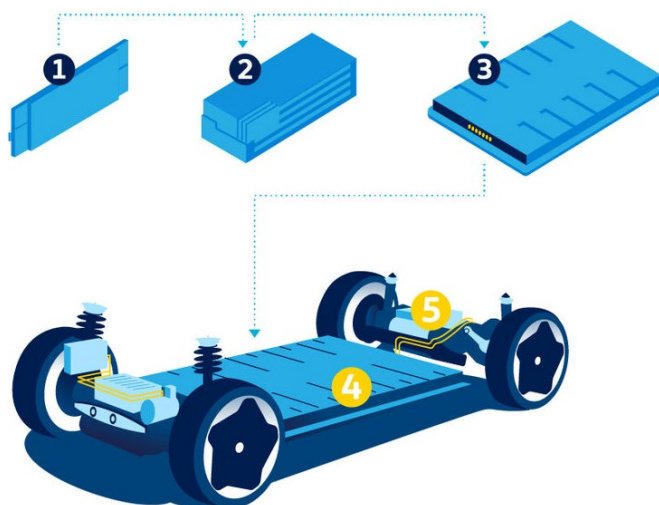


Abb. 2.4: Batteriesystem der Elektroplattform MEB in den Volkswagen ID-Modellen (VW24)

Die Abb. 2.4 zeigt den *Modularen E-Antriebsbaukasten* (MEB) des Automobilherstellers *Volkswagen AG*, welche in der ID.Fahrzeugreihe verbaut ist. Aus der Darstellung geht vereinfacht die Integration der LIB im E-Pkw hervor. Dafür werden die fertigen Batteriezellen (1) als Modul (2) zusammengeschaltet. Die Kombination dieser Module ergibt das Batteriesystem (3). Die gesamte Batterie (4) ist zwischen den Fahrzeugachsen platziert und mit dem E-Motor (5) verbunden. (vgl. KUC22, S. 306) (vgl. VW24)

Durch die Anordnung kann die LIB wiederholt Strom speichern und an den E-Motor abgeben. Beim Aufladevorgang werden die beiden Elektroden an eine Stromquelle, in diesem Fall einen Ladestecker, angeschlossen. Dadurch entsteht am Minus-Pol der Anode ein Elektronenüberschuss. Dieser bewirkt, dass sich positiv geladene Li^+ -Ionen aus dem Lithium-Metalloxid an der Kathode lösen, da sie von der Anode angezogen werden. Zwischen den Lithiummetalloxiden und dem Graphit baut sich eine innere Spannung in der Batterie auf. Infolgedessen laufen Redoxreaktion (Oxidation und Reduktion) zwischen den Elektroden ab. Das Elektrolyt ermöglicht, dass sich die Li^+ -Ionen in Richtung des Graphits wandern und sich dort anodenseitig einlagern. Wenn die gespeicherte Ladung in der Batterie anschließend für den Betrieb des E-Pkw bereitgestellt werden soll, beginnt der Entladevorgang. Dieser kehrt den Prozess wieder um. Dafür wird der E-Motor an die Ladungspole der Elektroden angeschlossen. Die Elektronen wandern über die Kabelverbindung von der negativen Anode zur positiven Kathode und erzeugen damit einen Stromfluss. Die Li^+ -Ionen gleichen die Entladung aus, indem sie wieder zurück zur Kathode wandern. (vgl. KUC22, S. 303 f.) (vgl. DOP20, S. 148 ff.)

Dieser Ablauf ist reversibel und kann also wiederholt werden. Denn beim ersten Laden bauen sich Deckschichten aus den Lithiumsalzen des Elektrolyt an den Elektroden auf. Diese lassen analog zum Separator ausschließlich Li^+ -Ionen passieren und schützen die Batterien vor einem Elektronenfluss innerhalb der Batterie. Jedoch nimmt die Dicke dieser Schichten mit jedem Ladevorgang leicht zu. In der Folge erhöht sich der innere Widerstand der Batterie und die Spannung nimmt ab. Dadurch wird die Gesamtkapazität der LIB und somit die Lebensdauer langfristig reduziert.

2.3.4 End of Life und Recycling

Aufgrund der durch die wiederholten Ladevorgänge bedingten Leistungsabnahme erreicht die Batterie ein Nutzungsende für den Einsatz im E-Pkw. Dieser als EoL bezeichnete Zustand wird in der Regel festgestellt, wenn nur noch etwa 70 % der ursprünglichen Kapazität zur Verfügung stehen. Die dezimierte Speicherfähigkeit wirkt sich auf die Reichweite des E-Fahrzeugs aus, sodass die Nutzung für den Kunden uninteressant wird. Dies tritt in der Regel nach ca. 1.000 Ladezyklen ein (vgl. THI20, S. 16). Anschließend kommt die Batterie entweder für eine

Zweitnutzung (*Second-Life*) oder das Recycling in Frage. Mit dieser Möglichkeit, bietet sich die Chance, den eingesetzten Rohstoffgehalt wiederzugewinnen. Diese Option ermöglicht neben dem Abbau eine zusätzliche Lithiumquelle und wird daher im Kapitel 4.3 im Rahmen der Ressourcenverfügbarkeit untersucht. (vgl. DOP20, S. 132 ff.)

Zum jetzigen Zeitpunkt spielt die Gewinnung von Lithium aus dem Recycling der Batterien von E-Pkw im Vergleich zum Abbau des Rohstoffs in den Minen noch eine untergeordnete Rolle (Stand 2023) (vgl. FTZ23 , S. 25). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Markteintritt und Hochlauf der E-Mobilität erst Ende der 2010er Jahre beginnt (siehe Absatzentwicklung im nachfolgenden Kapitel 3.4). Die durchschnittliche Betriebsdauer für diese Fahrzeuge wird jedoch auf ca. acht bis zwölf Jahre geschätzt. Ein mittlerer Wert von ca. zehn Jahren wird sowohl von *Benchmark Mineral Intelligence* als auch von der *International Renewable Energy Agency* (IRENA) bestätigt (vgl. GCC22) (vgl. IRE22, S. 24). Aktuell werden demzufolge noch wenige E-Fahrzeuge ausrangiert, deren Batterien aufbereitet werden können. Durch die zum jetzigen Zeitpunkt geringe Anzahl der zur Verfügung stehenden Akkus ist die Wiederaufbereitung aktuell unwirtschaftlicher, als die Beschaffung aus primären Quellen, denn der Prozess ist energie- und kostenintensiv. Die Effizienz könnte sich jedoch in Zukunft bei einer höheren Anzahl an Rückführungen steigern, sodass die Wiederaufbereitung ökonomisch rentabel wird. Daher ist der Angebotspreis ein entscheidendes Kriterium für die Nachfrage der Automobilindustrie und somit auch für die Durchführung von Recyclingmaßnahmen. Je höher die CO₂-Bepreisung in Zukunft ausfällt, desto attraktiver ist das Recycling. (vgl. DERA23, S. 35 f.) (vgl. BMBF23, S. 17) (vgl. RUD23) (vgl. FTZ23, S. 25)

Bei der Realisierung muss gewährleistet werden, dass eine verfahrensbedingte Verunreinigung ausgeschlossen wird, um die Qualitätsansprüche des *Battery-Grade* für die Batteriezellenproduktion zu erfüllen (siehe Kapitel 2.3.1). Weitere Herausforderungen im Zuge der Aufbereitung ergeben sich aus den korrosiven Eigenschaften sowie dem erhöhten Entzündungsrisiko der Batterie, wodurch die Verfahrenstechnik verstärkten Sicherheitsvorschriften unterliegt. Zudem erschwert die aktuell divers aufgestellte Materialzusammensetzung der Akku-Typen (u.a. NMC, NCA, LFP, siehe Kapitel 2.3.3) die Durchführung einer Demontage und anschließenden Separation. Neben Lithium besteht die Batterie aus vielen weiteren Komponenten, wobei der individuelle Aufbau, die Rohstoffanteile der Zelle und damit auch der Restwert sich teilweise stark voneinander unterscheiden (vgl. THI20, S. 21 f.). Infolgedessen sind verschiedene Vorgehensweisen erforderlich, weswegen es bislang noch keinen standardisierten Prozess in der Recyclingindustrie gibt. Wenn die spätere Zerlegung bereits in der Konstruktionsphase berücksichtigt wird – beispielsweise das Fügeverfahren und die mögliche Demontage im E-Pkw – können Recyclingabläufe erleichtert werden. Die industrielle Umsetzung muss daher perspektivisch

durch innovative Techniken sowie flexible Recyclingkapazitäten und -prozesse unterstützt werden (vgl. KOE21). Vor allem der Einsatz von automatisierten und digitalisierten Systemen ist entscheidend, um trotz erschwelter Bedingungen einen wirtschaftlichen Prozess zu gewährleisten. Durch den erheblichen zeitlichen Verzug von ca. zehn Jahren zwischen der Batterieherstellung und der Zuführung ins Recycling, können sich die Unternehmen jedoch frühzeitig an die künftigen Bedingungen des jeweiligen Batterietyps anpassen. (vgl. DERA23, S. 36 f., S. 54) (vgl. PAVB23, S. 11) (vgl. WIK21, S. 152) (vgl. BMBF23, S. 17)

Dem Weiteren kann die Intensivierung des Recyclings in Zukunft in Teilen den Abbau substituieren. Der weitweite Konsum von Rohstoffen ist stark an der CO₂-Belastung, des Wasserbrauchs sowie am Artensterben in der Tierwelt beteiligt. Durch den Einsatz von recycelten Materialien entsteht daher die Chance, die Umweltauswirkungen zu verringern und in Bezug auf Lithium, die Nachhaltigkeit der E-Mobilität verbessern. Daher wird es zukünftig sowohl aus wirtschaftlicher als auch ökologischer Sicht sinnvoll sein, eine hohe Materialrückgewinnung aus den Altbatterien anzustreben. (vgl. DERA23, S. 35 f.) (vgl. BMBF23, S. 17) (vgl. RUD23) (vgl. FTZ23, S. 25)

Für mögliche alternative *Second-Life*-Anwendungen kommen zum Beispiel stationäre Stromspeicher zur Einspeisung von Solarenergie für die Versorgung eines Haushaltes in Frage. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass sich die Batterietechnologie in den folgenden Jahre rapide weiterentwickelt. Infolgedessen unterliegen ältere Batterien den Effizienzanforderungen der neuen Batterien deutlich, sodass eine Zweitnutzung in der Regel entfällt. Zudem müssen der Fahrzeugwert sowie die bei der Demontage der E-Pkw zur Entnahme der LIB entstehenden Kosten unterhalb des Restwertes der Batterie liegen, damit eine Zweitnutzung gewinnbringend angeboten werden kann. Spätestens nach dem *Second-Life* müsste die Batterie ausgemustert werden. Danach stellt die Batterie – mit zeitlichen Verzögerungen um bis zu zehn weitere Jahre – ebenfalls eine mögliche Recyclingquelle dar. (vgl. RUD23). Aus diesen Gründen wird die Möglichkeit eines *Second-Life* in der nachfolgenden Analyse nicht separat berücksichtigt und stattdessen die Recyclingpotenziale fokussiert. (vgl. BMBF23, S. 18 f.) (vgl. THI20, S. 20 f.)

2.4 Prognose- und Szenariotechnik

Neben den inhaltlichen theoretischen Grundlagen wird das methodische Vorgehen bei der Erstellung von Prognosen und Szenarien untersucht. Die Zielsetzung dieser Arbeit beinhaltet eine Analyse des Bedarfs und der Ressourcenverfügbarkeit von Lithium für die E-Mobilität bis zum Jahr 2035. Dabei wird ein Zeithorizont gewählt, der noch in der Zukunft liegt und für den keine exakte Vorhersage möglich ist. Nichtsdestotrotz kann eine Prognose auf Basis der heute zur Verfügung stehenden Informationen erstellt werden. Diese kann mithilfe von qualitativen

Methoden, die beispielsweise auf Experteninterviews basieren, oder quantitativ durch mathematische Modelle erstellt werden. Letzteres wird in der anschließenden Untersuchung angewandt. Bei der Erhebung der Daten sollte der Vergangenheitsverlauf berücksichtigt und fortgeschrieben werden. Daher ist die Betrachtung von bereits zurückliegenden Daten wichtig. Zudem wird zwischen einem kurz- mittel- oder langfristigen Zeithorizont unterschieden. Die Analyse bis zum Jahr 2035 liegt über zehn Jahre in der Zukunft. Bei einer solchen Langfristprognose werden sich anzeigende Trends, also eine grobe Entwicklungstendenz, dargestellt. Der Verlauf kann sich zum Beispiel linear, exponentiell oder regressiv abzeichnen und die Steigung innerhalb eines Zeitraums flach oder stark ausgeprägt sein. Die Ergebnisse der langfristigen Prognose können wertmäßig nicht als Grundlage für detaillierte Planungen verwendet werden. Vielmehr sollen aus der ermittelten Beziehung allgemeine Aussagen bezüglich möglicher Risiken und Chancen hervorgehen oder Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Im Sinne der Beschaffungsmarktforschung können Datenaufbereitungen die zu erwartenden Marktentwicklungen näherungsweise offenlegen (vgl. LAS22, S. 2). (vgl. KAM24) (vgl. WLX24) (vgl. MEF24, S. 209 ff.) (vgl. KUE23, S. 241 ff.)

Die quantitative Prognose wird als Zusammenhang zwischen einer gesuchten variablen Größe in Abhängigkeit der Zeit grafisch in Beziehung gesetzt. In der nachfolgenden Analyse wird der Bedarf sowie die Verfügbarkeit von Lithium auf der y-Achse und der Zeitstrahl auf der x-Achse bis zum Jahr 2035 abgebildet. Ausgehend von den Vergangenheitswerten werden zur Fortsetzung der Datenreihen stochastische Methoden angewandt. Beispielsweise werden Extrapolationen¹¹ durchgeführt. Dafür wird bei linearen Kurvenverläufen die durchschnittliche *Steigung* $a = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ aller vorliegenden Vergangenheitswerte berechnet und auf die anschließenden Jahre übertragen. Eine Verwendung aller Datenpunkte ist demnach nur bei konstanten Rahmenbedingungen und stabilen Verläufen sinnvoll. Bei nichtlinearen Bedingungen sollte hingegen die Steigung der jüngsten Werte fortgesetzt werden. (vgl. WAN21, S. 58) (vgl. WLX24) (vgl. KUE23, S. 165 ff.)

Komplexe Problemstellungen erfordern die separate Betrachtung einzelner Einflussgrößen. Die Prognose wird demzufolge aus dem Zusammenspiel der jeweiligen Parameter aufgebaut. Dabei können vereinfacht Hypothesen zu konstanten Faktoren angenommen werden, die im gesamten Untersuchungszeitraum unveränderlich bleiben. Die für den Bedarf und die Ressourcenverfügbarkeit von Lithium relevanten Elemente werden in der nachfolgenden Analyse beschrieben und untersucht. Jedoch ist die Entwicklung einer Prognose von diversen Ursache-Wirkungskorrelationen abhängig. Diese teils sehr ambivalenten Einflüsse können zu

¹¹ **Extrapolation:** Prognose des zu erwartenden Verlaufs auf Basis der bekannten Werte. Im Gegensatz zur Interpolation (=Bestimmung von Werten, die zwischen den bekannten Punkten liegen) liegt das Ergebnis außerhalb der bekannten Datenreihe. (vgl. PIE24) (vgl. HOL24)

unterschiedlichen Ausprägungen beim Endergebnis führen und somit dessen Aussagekraft verringern. Zum Beispiel beeinflussen ökonomische, gesellschaftliche und politische Faktoren das Marktgeschehen. Um deutlicher differenzieren zu können, kann eine Prognose durch den Einsatz von Szenariotechnik ergänzt werden. Dabei werden zunächst verschiedene Zukunftsperspektiven formuliert, die jeweilige Tendenzen der Entwicklung zeigen. Üblicherweise wird ein auf dem Mittelwert der Einflussfaktoren basierender Verlauf gebildet, der die wahrscheinlichste Prognose widerspiegelt. Zusätzlich werden weitere Szenarien gegenübergestellt, die zum Beispiel eine begründete Abweichungsmöglichkeit vom Mittelwert¹² nach oben und unten berücksichtigen. Dafür werden die Einflussgrößen diversifiziert, sodass exemplarisch jeweils unter- oder überdurchschnittliche Wertausprägungen verwendet werden. Insgesamt entsteht damit für das zu prognostizierende Zeitintervall eine Spannweite des Ergebnisses. Dieses Vorgehen ist insbesondere bei dynamischen Märkten sinnvoll, die keinem regelmäßigen Verlauf folgen und deren langfristige Trend unsicher ist. Die Definition trifft auf den Verlauf der Mobilitätswende von Verbrennern auf E-Fahrzeugen zu. Da der Absatz von E-Pkw erst seit einigen Jahren hochläuft, liegen keine Erfahrungswerte vor, welche die zukünftige Entwicklung eindeutig vorhersagen könnten. Zudem sind die Lithiumnachfrage und das -angebot in diesem Zuge stark von der E-Mobilität beeinflusst, sodass auch hier Unsicherheit herrscht (siehe Kapitel 2.1). Aus den genannten Gründen ist eine Anwendung der Prognosetechnik im Verbund mit Szenarien in der nachfolgenden Analyse angebracht. (vgl. KAM24) (vgl. GAB24) (KUE230, S.130 ff.)

¹² **Mittelwert:** Durchschnitt aller berücksichtigten Daten. Zur Berechnung des arithmetischen Mittels \bar{x} wird allgemein die folgende Formel verwendet. (vgl. LAM17, S. 10)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (X_1 + X_2 + \dots + X_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

$X = \text{Wert} \mid n = \text{Anzahl der Werte}$

3 Prognose des Lithiumbedarfs für E-Pkw bis 2035

In diesem Kapitel wird der jährliche Bedarf des Rohstoffs Lithium für den Einsatz in E-Pkw analysiert. Dabei wird die Entwicklung bis zum Jahr 2035 auf globaler Ebene prognostiziert. Vorgehend werden die nachfolgenden Schritte zur Bedarfsermittlung anhand der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Definition von drei Szenarien der möglichen zukünftigen Nachfrageentwicklung. Darauf aufbauend wird die Analyse durchgeführt, wobei in Bezug auf die Szenarien zwischen verschiedenen Tendenzen der Parameter differenziert wird. Abschließend werden die einzelnen Faktoren kombiniert und im Resultat der jeweilige Bedarf bis zu Jahr 2035 abgeleitet.

3.1 Vorgehensweise zur Ermittlung des Bedarfs

Um den Lithiumbedarf zu bestimmen, wird zunächst die folgende Überlegung getroffen: Wie viel Lithium wird pro E-Auto benötigt und wie viele E-Pkw werden weltweit jährlich bis 2035 verkauft? Anhand der Beantwortung dieser Fragestellungen, kann die benötigte Lithiummasse berechnet und somit eine Bedarfsprognose erstellt werden.

Der Lithiumbedarf in Abhängigkeit des untersuchten Jahres $B_{E-Pkw}(Jahr)$ [kg] wird demnach durch die Lithiummasse pro E-Pkw M_{E-Pkw} [kg] und den jahresabhängigen Absatz¹³ $A_{E-Pkw}(Jahr)$ abgeleitet. Der Zusammenhang wird mithilfe der folgenden Formel ausgedrückt:

$$B_{E-Pkw}(Jahr) [kg] = M_{E-Pkw} [kg] * A_{E-Pkw}(Jahr)$$

Im ersten Schritt wird daher die Masse M_{E-Pkw} [kg] bestimmt. Diese Einflussgröße ist wiederum von mehreren Einzelfaktoren abhängig:

- Wie viel Lithium wird benötigt, um eine Batteriekapazität von 1 kWh zu generieren?
- Wie hoch kann die durchschnittliche Kapazität eines E-Pkw angesetzt werden?
- Welcher ergänzender Faktor für den Lithiumbedarf muss angenommen werden, um den bei der Batteriezellenproduktion anfallenden Ausschuss zu kompensieren?

Dementsprechend wird M_{E-Pkw} [kg] durch das Produkt aus der spezifischen Lithiummasse $m \left[\frac{kg}{kWh} \right]$, der durchschnittlichen Kapazität C_{E-Pkw} [kWh] sowie den Fehlerkompensationsfaktor F substituiert. Die genannten Einzelfaktoren werden anschließend in die obige Formel eingesetzt:

$$B_{E-Pkw}(Jahr) [kg] = m \left[\frac{kg}{kWh} \right] * C_{E-Pkw} [kWh] * F * A_{E-Pkw}(Jahr)$$

$$\text{mit } M_{E-Pkw} [kg] = m \left[\frac{kg}{kWh} \right] * C_{E-Pkw} [kWh] * F$$

¹³ **Absatz:** Anzahl an verkauften Gütern in einem definierten Zeitraum. *Hier:* E-Pkw pro Jahr. (vgl. KIR24)

3.2 Szenarien der Lithiumnachfrage

Die nachfolgend zu untersuchenden verantwortlichen Einflussgrößen für den Lithiumbedarf können verschiedenen Ausprägungen annehmen und damit auch zu abweichenden Endergebnissen führen. Daher werden folgend drei Szenarien der Lithiumnachfrage unter Berücksichtigung des Spielraums bei den zu analysierenden Faktoren beschrieben.

Mid-Case-Szenario S_{Mid} – mittlerer Trend der Lithiumnachfrage

In diesem Szenario nimmt die Bedeutung von alternativen Technologien zur Reduktion der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern stetig zu. Bei der Batterieentwicklung werden Erfahrungen gesammelt und Fortschritte erzielt, sodass durch einen verbesserten Materialeinsatz der Preis für E-Pkw leicht sinkt. Die Mobilitätswende wird zusätzlich zum Teil durch staatliche Förderprogramme unterstützt und der Ladeinfrastrukturausbau vorangetrieben. Die daraus resultierende Nachfrage des Kunden führt zu einem moderaten Hochlauf der E-Mobilität. Dabei sind sowohl hochleistungsfähige Langstreckenfahrzeuge als auch Kleinwagen für die städtische Nutzung relevant. Jedoch wird die Umsetzung in den Regionen der Welt unterschiedlich stark vorangetrieben. Daher werden parallel auch weiterhin konventionelle Pkw zugelassen. Insgesamt wird ein mittlerer Lithiumbedarf angenommen.

→ Im Szenario S_{Mid} wird der aus heutiger Sicht wahrscheinliche Verlauf des Lithiumbedarfs untersucht. Das Lithiumgewicht pro E-Pkw M_{E-Pkw} [kg] sowie die globale Absatzentwicklung $A_{E-Pkw}(Jahr)$ leiten sich daher aus den mittleren Ergebnissen der nachfolgenden Analyse ab.

Minimal-Case-Szenario S_{Min} – niedrige Lithiumnachfrage

Bei dem Szenario S_{Min} kann das Bedürfnisse des Kunden nach einer hohen Reichweite nicht ausreichend durch die E-Fahrzeuge gedeckt werden. Konventionelle Pkw können im direkten Vergleich kostengünstiger erworben werden und der Preis spielt für die Menschen eine höhere Bedeutung als das Umweltbewusstsein. Die Nachfrage konzentriert sich daher hauptsächlich auf PHEVs sowie kleine E-Autos für den alltäglichen Gebrauch auf Kurzstrecken, sodass die Verbrennerantriebe dominant bleiben. Die Batteriehersteller realisieren eine Reduktion des erforderlichen Lithiumeinsatzes, teilweise auch durch alternative Batterievarianten. Dadurch kann die erforderliche Materialkostensenkung erreicht werden, die nötig ist, um die E-Pkw zu günstigen Konditionen anbieten zu können. Insgesamt wird die Mobilitätswende in diesem Szenario auch durch mangelhafte politische Unterstützung, fehlende Lademöglichkeiten sowie eine geringe Akzeptanz der E-Autos in der Bevölkerung verzögert. Im Ergebnis wird für das Szenario S_{Min} eine niedrige Lithiumnachfrage erwartet.

→ Für das Lithiumgewicht pro E-Pkw M_{E-Pkw} [kg] sowie die globale Absatzentwicklung $A_{E-Pkw}(Jahr)$ wird im Szenario S_{Min} eine Tendenz unterhalb des Durchschnitts angenommen

Maximal-Case-Szenario S_{Max} – hohe Lithiumnachfrage

In dem Szenario S_{Max} spielt ein nachhaltiger Lebensstil eine übergeordnete Rolle bei den Menschen. Gleichzeitig ist der Wunsch nach individueller Mobilität hoch. Das gesteigerte Umweltbewusstsein macht sich dadurch bemerkbar, dass sich die E-Mobilität weltweit fortschreitend bei den Kunden durchsetzt. Die Automobilhersteller reagieren auf die große Nachfrage nach langstreckenfähigen E-Pkw indem überwiegend BEVs mit hohen Batteriekapazitäten produziert werden. Zur Effizienzsteigerung werden teilweise neue Technologien eingeführt, die einen höheren Lithiumanteil benötigen. Durch staatliche Subventionen und Kaufprämien sind E-Autos für den Kunden finanzierbar. Die Umsetzung einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur ist erfolgreich. Infolgedessen werden Hemmnisse der Kunden überwunden. Im Gegensatz zu S_{Min} entsteht im Szenario S_{Max} ein besonders hoher Lithiumbedarf.

→ Bei dem Szenario S_{Max} wird für das Lithiumgewicht pro E-Pkw M_{E-Pkw} [kg] sowie die globale Absatzentwicklung $A_{E-Pkw}(Jahr)$ eine Tendenz oberhalb des Durchschnitts angenommen.

3.3 Lithiumverbrauch pro E-Pkw

Im Folgenden wird unter Berücksichtigung verschiedener Literaturangaben und Studien ein Richtwert ermittelt, der den durchschnittlichen Lithiumbedarf pro E-Fahrzeug M_{E-Pkw} [kg] widerspiegelt. Das Ergebnis setzt sich dabei gemäß der im Kapitel 3.1 aufgestellten Formel aus den folgenden drei Einflussfaktoren zusammen:

- Spezifisches Lithiumgewicht in Abhängigkeit der Kapazität m $\left[\frac{kg}{kWh}\right]$
- Batteriekapazität C_{E-Pkw} [kWh]
- Fehlerkompensationsfaktor F

Für diese wird nachfolgend schrittweise ein repräsentativer Durchschnittswert ermittelt und für das Szenario S_{Mid} eingesetzt. Bei den jeweiligen Ergebnissen werden außerdem Abweichungsspielräume untersucht, um zwischen den Szenarien S_{Min} und S_{Max} zu differenzieren. Dabei werden die einzelnen Faktoren des Lithiumverbrauchs pro E-Auto vereinfacht als konstant betrachtet, die im zeitlichen Verlauf bis zum Jahr 2035 unverändert bleiben.

3.3.1 Spezifisches Lithiumgewicht in Abhängigkeit der Kapazität

Der in LIB verwendete Gewichtsanteil von Lithium kann in Abhängigkeit der Kapazität ausgedrückt werden. Der Bedarf ist durch den jeweiligen Batterietyp bedingt und kann daher variieren. In der Literatur sowie aktuellen Studien existieren in diesem Kontext verschiedene Annahmen für den erforderlichen Lithiumgehalt je kWh. Diese werden folgend zusammengeführt, um einen realistischen Skalenbereich des Werts zu bestimmen.

Bezeichnung	spez. Lithiumgewicht [kg/ kWh]	Quellenverweis
m_1	0,092	(vgl. KHE24, S.141)
m_2	0,100	(vgl. SAC23)
m_3	0,102	(vgl. DERA21, S.98 ff.)
m_4	0,110	(vgl. WAL23)
m_5	0,120	(vgl. SCH20) / min.
m_6	0,150	(vgl. MAE19)
m_7	0,150	(vgl. GIZ21 S.17)
m_8	0,160	(vgl. BAU23)
m_9	0,180	(vgl. SCH20) / max.
Mittelwert m_\emptyset	0,129	
Median m_{Med}	0,120	

Tab. 3.1: spezifisches Lithiumgewicht in Abhängigkeit der Kapazität

Die Tab 3.1 beinhaltet neun Richtwerte ($m_1 - m_9$) für die spezifische Masse m – also das Lithiumgewicht, das pro kWh Batteriekapazität benötigt wird. Diese sind aufsteigend vom geringsten bis zum höchsten Wert sortiert. Nachfolgend wird die Verwendung sowie ggf. die Herleitung der einzelnen Werte begründet.

(m_1) Nach Kampker und Heimes werden 9,2 kg Lithium für eine Kapazität von 100 kWh benötigt. Mithilfe einer Division durch 100 wird der Wert je kWh errechnet. Demnach ergibt sich ein Gewichtsanteil von $0,092 \frac{kg}{kWh}$. (vgl. KHE24, S. 141)

$$(m_1) = \frac{9,2 \text{ kg}}{100 \text{ kWh}} = \frac{9,2}{100} * \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = 0,092 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

(m_2) Der zweite Tabellenwert basiert auf dem Beispiel eines E-Pkw mit einer Batteriekapazität von 60 kWh, in dem 6 kg Lithium enthalten sind. Diese Angaben verweisen auf das *Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)*. Analog zu der Berechnung von m_1 wird daher durch 60 dividiert, um das Gewichtsverhältnis zu bestimmen. Daraus ergibt sich ein Anteil von $0,1 \frac{kg}{kWh}$. (vgl. SAC23)

$$(m_2) = \frac{6 \text{ kg}}{60 \text{ kWh}} = \frac{6}{60} * \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = 0,1 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

(m_3) Dieser Wert basiert auf dem Ansatz, die verschiedenen Bauarten der Li-Ion-Batterie zu berücksichtigen. Die Kathoden weisen jeweils verschiedene Materialzusammensetzungen und damit auch Lithiumanteile auf (siehe Kapitel 2.3.3). Daher entscheidet die Nutzung eines bestimmten Kathodentyps über den Lithiumbedarf der Batterie. Eine Studie der DERA prognostiziert die zu erwartenden Marktanteile von ausgewählten Kathoden für den

E-Mobilität zweck für die Jahre 2025, 2030 sowie 2035. Aus diesen Informationen wird der durchschnittliche Lithiumanteil abgeleitet (siehe Anhang A.3.1). (vgl. DERA21, S. 98 ff.)

Demnach werden aktuell (Stand 2020) und auch in Zukunft insbesondere NMC-Zusammensetzungen dominant in E-Pkw verwendet (ca. 75 %). Diese Angabe wird ebenfalls durch eine Studie des *Öko-Instituts* unterstützt (vgl. OEI23, S. 19). Bei der NMC-Kathode wird zwischen verschiedenen Verhältnissen zwischen den Bestandteilen aus Nickel, Mangan und Kobaltoxid differenziert und dieses numerisch gekennzeichnet. Zum Beispiel weist eine *NMC-811* Kathode einen achtfachen Nickelgehalt gegenüber Mangan und Kobaltoxid auf (8:1:1). Die verschiedenen Möglichkeiten der Materialkombinationen haben einen Einfluss auf die Batterieparameter, zum Beispiel eine verbesserte Energiedichte und Kapazität bei *NMC-811* als bei *NMC-111*. Ein weiterer Grund für die Auswahl einer *NMC-811* Kathode stellen Einsparungen des Kobaltgehalts (10 % statt 1/3) dar, wodurch letztendlich die gesamten Materialkosten gesenkt werden. Obwohl diese Elemente daher den größten Gewichtsschwankungen unterliegen, wirkt sich der NMC-Typ ebenfalls auf den Anteil von Lithium aus. Während in einer *NMC-111* Kathode etwa $0,12 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$ benötigt werden, ist bei *NMC-811* mit $0,096 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$ zu rechnen. Ab dem Jahr 2030 könnte zudem die Kathode Hochenergie-NMC (HE-NMC) an Bedeutung gewinnen, welche eine weitere Steigerung der Energiedichte sowie Reduzierung der Kosten erzielen könnte. Dadurch erhöht sich das Lithiumgehalt auf $0,123 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$ und die Kathode würde in ca. 10 % der in E-Pkw verbauten Batterien eingesetzt werden. Neben NMC werden zudem LFP- sowie NCA-Kathoden verwendet. Diese weisen im direkten Vergleich zu NMC einen geringeren Lithiumbedarf auf ($0,095 - 0,098 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$), machen aber auch nur einen geringen Marktanteil von 12-14 % aus. (vgl. DERA21, S. 98 ff.)

Die Schwankungen des Materialgehalts der verschiedenen Kathoden müssen daher in Abhängigkeit ihrer prozentualen Verwendung in dem untersuchten Jahr gewichtet werden. Anschließend kann ein Mittelwert abgeleitet werden. Die genaue Berechnung sowie die Zwischenergebnisse können in tabellarischer Form dem Anhang A.3.1 entnommen werden. Die Ergebnisse der einzelnen Jahre weisen trotz der starken Unterschiede bei den Marktanteilen in den betrachteten Jahren nur geringfügige Abweichungen ($\Delta = 0,005 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$) zwischen dem Maximal- und Minimalwert auf ($0,101 - 0,106 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$). Daher wird m_3 als über alle Jahre konstant mit durchschnittlich $0,102 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$ angenommen. (vgl. DERA21, S. 98 ff.)

$$(m_3) = \frac{\sum (\text{Marktanteil Kathode}_i [\%] * \text{spez. Lithiumgewicht} [\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}])}{i} = 0,102 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

$i = \text{Anzahl der Daten (Jahre)} = 4$

(m₄) Der nächste Wert wird wie bereits bei **m₁** und **m₂** über das Lithiumgewicht eines gesamten Akkus abgeleitet. In dem Beispiel von Wallner ist für eine 50 kWh Batterie eine Materialbedarf von 5,5 kg Lithium angegeben. Entsprechend werden $0,11 \frac{kg}{kWh}$ benötigt. (vgl. WAL23)

$$(m_4) = \frac{5,5 \text{ kg}}{50 \text{ kWh}} = \frac{5,5}{50} * \frac{kg}{kWh} = 0,11 \frac{kg}{kWh}$$

(m₅) In Abhängigkeit der eingesetzten Batterieausführung befinden sich Schäfer zufolge zwischen 0,12 und 0,18 kg Lithium pro kWh in einem E-Auto. Daher wird mit $0,12 \frac{kg}{kWh}$ der untere Grenzwert für die Gesamtanalyse berücksichtigt. Das angegebene Maximalgewicht wird ebenfalls separat als weiterer Wert bei **m₉** aufgeführt (siehe unten). (vgl. SCH20)

(m₆) März gibt einen Richtwert von $0,15 \frac{kg}{kWh}$ für den Lithiumbedarf an. (vgl. MAE19)

(m₇) Die *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) GmbH konstatiert ein Lithiumgewicht von 4,5 kg in einer Batterie mit 30 kWh. Dabei wird eine NMC111-Kathode zugrunde gelegt. Demnach werden nach dem Rechnungsschema von **m₁**, **m₂** und **m₄** ebenfalls $0,15 \frac{kg}{kWh}$ benötigt. (vgl. GIZ21)

$$(m_7) = \frac{4,5 \text{ kg}}{30 \text{ kWh}} = \frac{4,5}{30} * \frac{kg}{kWh} = 0,15 \frac{kg}{kWh}$$

Das Ergebnis liegt deutlich über der Angabe der DERA-Studie (siehe **m₃**) von $0,102 \frac{kg}{kWh}$ bei einer NMC-111 Batterie. Dies zeigt, dass die Gewichtsbedarfe von Lithium selbst unter Verwendung desselben Batterietyps nicht eindeutig definiert sind und verschiedene Aussagen aufeinandertreffen. Daher müssen mehrere Quellen berücksichtigt werden, um einen fundierten Referenzwert für die folgende Analyse verwenden zu können. Aus diesem Grund kann auch nicht die deutlich präzisere Berechnung für **m₃** alleine als Ergebnis herangezogen werden, sondern wird neben den übrigen Berechnungsschemen miteingebunden.

(m₈) Zur Ermittlung dieses Werts wird auf Basis einer Prognose von Baumann gerechnet. Dieser erwartet für das Jahr 2030 einen Lithiumbedarf für Mobilitätsanwendungen von 385,6 kt bei einer benötigten Gesamtkapazität der Batterien von 2.410 GWh. Aus diesem Verhältnis wird das spezifische Lithiumgewicht mit $0,16 \frac{kg}{kWh}$ berechnet. (vgl. BAU23)

$$(m_8) = \frac{\text{Gesamtbedarf Lithium}}{\text{Gesamtkapazität}} = \frac{385,6 \text{ kt}}{2.410 \text{ GWh}} = \frac{385.600.000 \text{ kg}}{2.410.000.000 \text{ kWh}} = 0,16 \frac{kg}{kWh}$$

(m_9) Der letzte Wert aus der Tab. 3.1 repräsentiert den Maximalwert von $0,180 \frac{kg}{kWh}$ aus der bereits bei m_5 thematisierten Angabe von Schäfer (vgl. SCH20). Zur umfassenden Auswertung ist es wichtig, möglicherweise auftretende starke Abweichungen zu berücksichtigen.

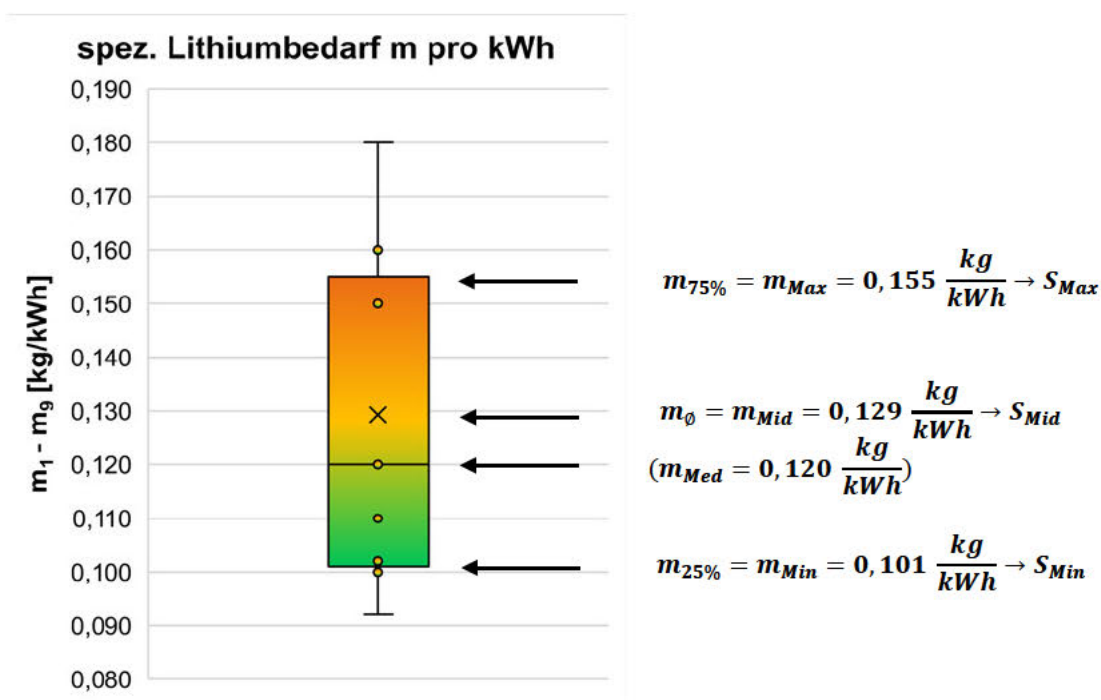


Abb. 3.1: Kastendiagramm mit Spannweite des spez. Lithiumgewichts [kg/kWh]

Im Anschluss werden die in Tab. 3.1 gesammelten Daten ausgewertet. Dazu wird ein Kastendiagramm (bzw. Boxplot) mit den Werten m_1 bis m_9 abgebildet (siehe Abb. 3.1). Dadurch wird eine übersichtliche Darstellung der relevanten Daten erzeugt, aus welcher die Streuung der Werte und Kennzahlen für die Interpretation der Ergebnisse entnommen werden können. Die y-Achse (links) gibt dabei den Wertebereich in der Einheit $\frac{kg}{kWh}$ an. Die Punkte repräsentieren die einzelnen Werte aus der Tab. 3.1 und die Abschlussstriche das kleinste (m_1) bzw. größte (m_9) Ergebnis. Die Spannweite von $0,092$ bis $0,180 \frac{kg}{kWh}$ führt im weiteren Verlauf der Arbeit zu stark voneinander abweichenden Endergebnissen des Lithiumbedarfs – eine annähernde Verdoppelung ist absehbar. (vgl. SFL24a) (vgl. LAM17, S. 9)

Um die Fragestellung des prognostizierten Lithiumbedarfs für E-Pkw beantworten zu können, werden daher Kennzahlen für die spezifische Masse m abgeleitet. Dabei wird zwischen den drei definierten Szenarien unterschieden.

Mid-Case-Szenario S_{Mid}

Das erste Szenario S_{Mid} soll den wahrscheinlichen Lithiumbedarf widerspiegeln. Aus diesem Grund wird hier der arithmetischen Mittelwert herangezogen (siehe Kapitel 2.4). Die Formel

wird auf die Werte der Tab. 3.1 übertragen. Das Ergebnis $m_{\emptyset} = 0,129 \frac{kg}{kWh}$ ist in der Abb. 3.1 mit einem X markiert und wird für die spezifische Masse m_{Mid} herangezogen.

$$m_{\emptyset} = m_{Mid} = \frac{1}{9}(m_1 + m_2 \dots + m_9) = 0,129 \frac{kg}{kWh}$$

$$X = m \mid n = 9$$

Alternativ könnte auch der Median verwendet werden. Dieser spiegelt den Wert wieder, der bei einer Sortierung der Werte m_1 bis m_9 nach der Größe in der Mitte liegt. In diesem Fall ist $m_5 = M_{Med} = 0,120 \frac{kg}{kWh}$ ¹⁴. Bei der Verwendung des Median haben besonders starke Abweichungen, wie m_1 oder m_9 , einen geringeren Einfluss auf das Ergebnis, als beim Mittelwert. Da aber die Möglichkeit besteht, dass der Lithiumbedarf pro kWh tatsächlich die Grenzwerte annimmt, werden im Rahmen dieser Arbeit alle vorliegenden Daten gleichwertig berücksichtigt. Durch die Wahl des Mittelwerts, werden also auch die stärkeren Abweichungen einbezogen. (vgl. LAM17, S. 10) (vgl. SFL24b)

Nach Angaben des *Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI)* wird sich der Rohstoffbedarf von Lithium bei den Batterien kaum reduzieren lassen (vgl. THI20, S. 12). Im Szenario S_{Mid} wird daher davon ausgegangen, dass bei der spezifische Lithiummasse kaum Einsparpotenziale erreicht werden können. Die Analyse von m_3 bestätigt ebenfalls die Prämisse eines stabiles Lithiumbedarfs pro kWh, der für die LIB bis 2035 nicht wesentlich reduziert werden kann (vgl. DERA21, S. 98 ff.). Daher wird angenommen, dass der errechnete Mittelwert $m_{Mid} = 0,129 \frac{kg}{kWh}$ auf Basis der aktuellen Tabellenwerte m_1 bis m_9 bis zum Jahr 2035 verwendet werden kann.

Minimal-Case-Szenario S_{min}

Das zweite Szenario S_{min} beschreibt die Möglichkeit eines niedrigen Lithiumbedarfs. Daher wird hierfür auch eine geringere spezifische Masse $m_{Min} = 0,101 \frac{kg}{kWh}$ angenommen. Diese wird aus dem unteren Quartil $m_{25\%}$ der Abb. 3.1 abgeleitet. Das bedeutet, dass die niedrigsten 25 % der Werte nicht berücksichtigt werden. (vgl. LAM17, S. 9)

¹⁴ Berechnung des Median: (vgl. LAM17, S. 8)

$$m_x = \begin{cases} X_{(r)} \text{ mit } r = \frac{n+1}{2}, & \text{falls } n \text{ ungerade} \\ X_{(r)} \text{ mit } r = \frac{n}{2}, & \text{falls } n \text{ gerade} \end{cases}$$

$$m_{Median} = m_{(r)} \text{ mit } r = \frac{9+1}{2} = 5 \mid n = 9 \text{ (ungerade)}$$

$$m_{Median} = m_5 = 0,120 \frac{kg}{kWh}$$

Für einen reduzierten Lithiumeinsatz spricht vor allem die Möglichkeit eines schnellen Technologiewechsels bei den Batterien. Während heutzutage fast überwiegend LIB in E-Fahrzeugen eingesetzt werden, könnten diese in den nächsten Jahren teilweise durch Alternativen substituiert werden. Die Batterietechnik wird erst seit wenigen Jahren in Pkw eingesetzt. Da insbesondere Materialien den höchsten Kostenanteil einer Batterie verursachen, kann davon ausgegangen werden, dass weiterhin Optimierungspotenziale bei der Zusammensetzung bestehen (vgl. PAVB21, S. 4). (vgl. VDMA23, S. 161 ff.)

Zum Beispiel können alternativ Natrium-Ionen-Batteries (SIB, dt.: Natrium-Ionen-Batterien) für die E-Pkw verwendet werden. Diese benötigen kein Lithium, da stattdessen Natrium als Aktivelement eingesetzt wird. Letzteres ist im Gegensatz zu Lithium einfacher zu beschaffen, da es zu den Materialien mit der sechsthöchsten Verfügbarkeit auf der Erde zählt (vgl. FEL17, S. 255). Infolgedessen können die Batterien etwa 20 bis 40 % günstiger hergestellt werden. Jedoch werden geringere Energiedichten¹⁵ und dadurch ein höheres Batteriegewicht¹⁶ hervorgerufen, wodurch die SIB mehr Platz im Auto beansprucht. Die Eigenschaften wirken sich negativ auf die Speicherkapazität und somit die Reichweite der E-Pkw aus. Durch weitere Forschung, könnten diese Parameter zukünftig potenziell verbessert werden. Darüber hinaus wird bislang von einem geringeren Kapazitätsabfall in Folge von niedrigen Temperaturen als bei der LIB ausgegangen, wodurch die SIB in den Wintermonaten effizienter wären. Insgesamt eignen sich diese Alternative bisweilen vor allem für kleine Fahrzeuge. Dieser Nutzungszweck entspricht dem Szenario S_{min} , da hier davon ausgegangen wird, dass die E-Mobilität eher zur städtischen Nutzung tendiert (siehe Kapitel 3.2). (vgl. ZIM24) (vgl. HEI23) (vgl. SPI24) (vgl. LAN24)

Der weltweit größte LIB-Batterieproduzent CATL hat bereits im Jahr 2021 einen Durchbruch bei der SIB-Entwicklung erreicht. Die Batterien sollen für den Einsatz im E-Pkw tauglich sein und bereits in Serie gefertigt werden können. Nach Angaben von *Spiegel Mobilität* werden SIB bereits seit Dezember 2023 serienmäßig in China produziert. Diese würden in Kleinwagen des Automobilherstellers *Anhui Jianghuai Automobile Group Corporation* (JAC) sowie des Konkurrenten *Jiangling Motors EV* (JMEV) eingesetzt werden. Zudem würden die Firmen Kooperation mit den europäischen Konzernen *Volkswagen* und *Renault* halten. Des Weiteren kündigt das chinesische Unternehmen BYD die Verwendung der Technologie in Teilen seine

¹⁵ **Energiedichte SIB:** Die Energiedichte der SIB beträgt mit ca. 140-160 Wh/kg etwa die Hälfte einer LIB (250-300 Wh/kg). (vgl. TAG23b) (vgl. SPI24) (vgl. FEL17, S. 257)

¹⁶ **Batteriegewicht:** Das geringere Lithiumgewicht gegenüber Natrium ist auf den atomaren Aufbau der Elemente zurückzuführen. Während Lithium (Ordnungszahl 3) ein mittleres Atomgewicht von 6,94 u aufweist, ist Natrium (Ordnungszahl 11) mit 22,99 u mehr als dreimal so schwer. In Bezug auf die Dichte der beiden Materialien, weist Natrium mehr als 80 % des Volumengewichts von Lithium auf (0,97 zu 0,53 g/cm³). (vgl. ZIM24) (vgl. FEL17, S. 257)

E-Pkw-Flotte an (vgl. TES23) (vgl. HEI23). Jedoch gäbe es aktuell noch keine offizielle Bestätigung und Bekanntmachung durch die Hersteller selbst (Stand 01/24). Im europäischen Raum investiert der französische Konzern *Stellantis* in das SIB-Start-Up *Tiamat*. Auch in Schweden werden bereits erfolgreich SIB von der Firma *Northvolt* entwickelt (vgl. TAG23b). (vgl. MAI23) (vgl. SPI24)

Da der Fortschritt bei dieser Batteriealternative bereits übergreifend voranschreitet, kann angenommen werden, dass SIB perspektivisch anteilig im E-Fahrzeugmarkt genutzt werden. Darüber hinaus haben die US-Regierung in Kooperation mit *Microsoft* nach Angaben von *Businessinsider* unter Zuhilfenahme von KI-Methoden vermutlich ein weitere Lithiumalternative identifiziert. Jedoch ist die praktische Umsetzung noch in der Prototypenphase und es wird nicht veröffentlicht, um welches Material es sich dabei handelt. Sollte die Batterievariante erfolgreich sein, besteht das Potenzial den Lithiumeinsatz um ca. 70 % zu verringern. Die Verbreitung von alternativen Batterietypen, die weniger oder teils gar kein Lithium benötigen, reduziert somit insgesamt die durchschnittliche Lithiummasse je kWh. Dementsprechend wäre eine niedrige Lithiummasse $m_{Min} = 0,101 \frac{kg}{kWh}$ im Szenario S_{min} plausibel. (vgl. BIN24)

Maximal-Case-Szenario S_{Max}

Analog zum Szenario S_{Min} wird für das Szenario S_{Max} das obere Quartil $m_{75\%}$ (siehe Abb. 3.1) als spezifische Masse festgelegt. Der Wert berücksichtigt die Eventualität eines hohen Lithiumbedarfs pro kWh. Demnach verweist $m_{Max} = 0,155 \frac{kg}{kWh}$ auf eine Abweichung vom Mittelwert, bei der die oberen 25 % der Daten nicht inbegriffen sind. (vgl. LAM17, S. 9)

Der höhere Lithiumbedarf könnte durch die Markteinführung einer Solid-State-Battery (SSB, dt.: Feststoffbatterie) hervorgerufen werden. Diese stellt eine potenzielle Alternative zu LIB dar und unterscheidet sich in erster Linie hinsichtlich der Elektrolyte. Während in LIB flüssige Zusammensetzungen Verwendung finden (siehe Kapitel 2.3.3), werden in der SSB feste Elektrolyte in Verbindung mit Oxiden¹⁷, Sulfiden¹⁸ oder Polymeren¹⁹ eingesetzt, wobei Letzteres nach aktuellen Kenntnissen am vielversprechendsten ist. Dadurch entsteht eine geringere Brandgefahr und höhere Sicherheit gegenüber der LIB. Zusätzlich können Ladezeiten verkürzt und höhere Energiedichten²⁰ als erreicht werden. Die SSB benötigt dafür jedoch 40 bis 100 % zusätzliches Lithium im Vergleich zur LIB. Infolgedessen werden

¹⁷ **Oxide:** Verbindung eines Elements mit Sauerstoff (O) (vgl. DCS24).

¹⁸ **Sulfide:** Verbindung eines Elements mit Schwefel (S) (vgl. SFL24c).

¹⁹ **Polymere:** setzen sich aus einer Vielzahl an Molekülverbindungen zusammen (vgl. FEL17, S. 557).

²⁰ **Energiedichte SSB:** liegt mit ca. 350-500 Wh/kg über der LIB (250-300 Wh/kg) (vgl. FRH22, S. 14).

Batteriereichweiten von über 1.000 km realistisch. Die Kosten liegen dabei jedoch derzeit noch deutlich über der LIB. Diese Alternative ist daher besonders für die größeren Fahrzeugklassen geeignet. Demzufolge dient eine SSB den Anforderungen an Langstreckenfahrzeuge gemäß der Definition des Szenario S_{max} (siehe Kapitel 3.2). (vgl. FRH22, S. 13 ff.) (vgl. HOC24) (vgl. VDMA23, S. 162 f.)

Nichtsdestotrotz ist die Technologie aktuell noch weniger ausgereift als beispielsweise die SIB. Die Hauptkompetenzen liegen derzeit vor allem in asiatischen und amerikanischen Ländern. Zum Beispiel soll im Jahr 2024 ein Pilotprojekt von *Nissan* umgesetzt werden und ein E-Pkw von *Nio* in Serie gehen. Auch *Toyota* setzt sich zum Ziel, Ende des Jahrzehnts SSB betriebene Fahrzeuge anzubieten. Nichtsdestotrotz arbeiten auch europäische Automobilhersteller wie *Volkswagen*, *BMW*, *Mercedes-Benz* und *Stellantis* in Kooperation mit diversen Entwicklungsfirmen an SSB-Prototypen und streben in den nächsten Jahren ebenfalls die Serienproduktion an. In diesem Zusammenhang könnte im Jahr 2035 ein Marktpotenzial von 5 bis 15 % entstehen. (vgl. HOC24) (vgl. STL23a)

Daher besteht die Möglichkeit, dass die SSB für den im Rahmen dieser Arbeit fokussierten Zeitraum bis 2035 von Relevanz sein wird – wenn auch eher in der zweite Hälfte. Im gesamten Durchschnitt wird dadurch trotzdem mehr Lithium pro E-Pkw benötigt, als bei einer 100%igen Marktdeckung durch LIB. Im Szenario S_{max} wird daher angenommen, dass in den kommenden Jahren ein Teil der LIB durch Feststoffbatterien ersetzt wird. Der deutlich höhere Materialeinsatz, unterstützt und begründet die hier getroffenen Annahme einer erhöhten durchschnittliche Lithiummasse $m_{Max} = 0,155 \frac{kg}{kWh}$.

3.3.2 Durchschnittliche Batteriekapazität eines E-Pkw

Neben dem Lithiumgehalt pro kWh m entscheidet die Größe der Batterie und die damit zur Verfügung stehende **Ladepkapazität C** (engl.: Capacity) über das gesamte Lithiumgewicht einer Batterie (vgl. GIZ21, S. 19). Dieser Einflussfaktor bestimmt im weiteren Verlauf den zu ermittelnden Lithiumbedarf. Dieses Kapitel untersucht daher die Frage: Wie hoch ist die Batteriekapazität $\varnothing C_{E-Pkw} [kWh]$ eines durchschnittlichen E-Pkw? (vgl. DERA23, S. 58)

Batteriekapazität $C_{Pkw-Klasse} [kWh]$	BEV	PHEV
Kleinwagen	30	24
Kompaktwagen	51	12
Oberklasse	83	14

Tab. 3.2: Durchschnittliche Batteriekapazitäten von E-Pkw (vgl. DERA21, S. 101)

Die dafür notwendige Berechnung einer repräsentativen Batteriegröße erfolgt auf Basis einer Studie der DERA. Diese unterscheidet zwischen verschiedenen Fahrzeugklassen (Kleinwagen, Kompaktwagen, Oberklasse) für die E-Fahrzeugtypen BEV sowie PHEV (siehe Tab. 3.2). Während die vollelektrischen BEV mit großen Batterien ausgestattet sind, benötigen PHEV eher kleine Ausführungen, da diese zusätzlich konventionell angetrieben werden (siehe Kapitel 2.1). Die jeweilige Batteriekapazität wird mit $C_{Pkw-Klasse} [kWh]$ angegeben. (vgl. DERA21, S. 101)

Neben dieser Differenzierung wird für die Ermittlung von $\varnothing C_{E-Pkw} [kWh]$ die prozentual anteilige Verteilung der jeweiligen Batteriegrößen benötigt. Die DERA prognostiziert in diesem Zusammenhang den globalen E-Pkw-Absatz für die – im Kontext dieser Arbeit – relevanten Jahre 2025, 2030 sowie 2035. Bei diesen Angaben wird mit verschiedenen Szenarien gearbeitet. Für die Bestimmung der durchschnittlichen Batteriekapazität wird das *Szenario Mittelweg*²¹ verwendet. Anhand der vorliegenden Daten wird die prozentuale Verteilung der Fahrzeugklassen abgeleitet und anschließend mit der jeweiligen Batteriekapazität aus der Tab. 3.2 multipliziert, um in Summe einen Durchschnittswert zu bilden. Aus den Zwischenergebnissen geht hervor, dass der Marktanteil von BEV zu PHEV im Mittel ungefähr bei 70 % zu 30% liegt. Dieses Verhältnis wird durch den VDMA ebenfalls gestützt (vgl. VDMA23, S. 12). Im Durchschnitt hat eine BEV-Batterie eine Kapazität von $\varnothing C_{BEV} = 69 kWh$ und bei den PHEVs von $\varnothing C_{PHEV} = 14 kWh$. Daraus ergibt sich insgesamt $\varnothing C_{E-Pkw} = 53 kWh$. Trotz der Berücksichtigung der jeweiligen Jahresprognosen gehen aus den Endergebnissen mit Ausnahme des Jahres 2030 (52 kWh) dieselben Werte für $\varnothing C_{E-Pkw}$ hervor. Daher wird diese Kapazität als Konstante über den gesamten Zeitraum hinweg festgelegt. Die vollständige tabellarische Berechnung kann im Anhang A.3.2 eingesehen werden. (vgl. DERA21, S. 36 ff., S. 101)

$$\varnothing C_{E-BEV} [kWh] = \sum Pkw-Klasse [\%] * C_{Pkw-Klasse BEV} [kWh] = 69 kWh$$

$$\varnothing C_{E-PHEV} [kWh] = \sum Pkw-Klasse [\%] * C_{Pkw-Klasse PHEV} [kWh] = 14 kWh$$

$$\varnothing C_{E-Pkw} [kWh] = (70\% * 69 kWh) + (30\% * 14 kWh) = 53 kWh$$

Mid-Case-Szenario S_{Mid}

In diesem Szenario wird die oben ermittelte Durchschnittskapazität $\varnothing C_{E-Pkw}$ verwendet. In der Definition des DERA-Szenarios *Mittelweg* werden ähnliche Annahmen getroffen, wie im

²¹ **DERA-Szenario Mittelweg:** Die DERA definiert in dem *Szenario Mittelweg* eine Welt, die an der Erreichung nachhaltiger Ziele arbeitet, dabei aber in Abhängigkeit der Regionen eine variierend stark ausgeprägte Umsetzung realisiert. Somit wird eine moderate Entwicklung der Nachhaltigkeit angenommen. (vgl. DERA21, S. 26 f.)

Szenario S_{Mid} . Der mittlere Wert entspricht der aus heutiger Sicht wahrscheinlichen Entwicklung. Daher wird hier $C_{Mid} = 53 \text{ kWh}$ gewählt.

Aus den beiden Einflussfaktoren $C_{Mid} = 53 \text{ kWh}$ und dem im vorherigen Kapitel bestimmten spezifischen Lithiumgewicht $m_{Mid} = 0,129 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$ kann eine Zwischenrechnung durchgeführt werden. Durch eine Multiplikation ergibt sich das Lithiumgewicht $M_{Mid,Netto} = 6,84 \text{ kg}$ (M_{Mid} ohne Berücksichtigung der Fehler durch Ausschuss) je Fahrzeugbatterie:

$$M_{Mid,Netto} [\text{kg}] = m_{Mid} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right] * C_{Mid} [\text{kWh}] = 0,129 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} * 53 \text{ kWh} = 6,84 \text{ kg}$$

Zum Vergleich sind in der LIB eines typischen Smartphones weniger als 0,01 g Lithium enthalten (vgl. BOH20, S. 3).

Minimal-Case-Szenario S_{Min}

Für das Szenario S_{Min} wird hingegen pauschal eine um 25% geringe Kapazität als $\emptyset C_{E-Pkw}$ angesetzt. Im Ergebnis wird daher $C_{Min} = 40 \text{ kWh}$ verwendet.

$$C_{Min} = \emptyset C_{E-Pkw} * (1 - 0,25) = 53 \text{ kWh} * 0,75 = 40 \text{ kWh}$$

Dies kann dadurch begründet werden, dass im Szenario S_{Min} neben PHEVs vor allem kleine Fahrzeugmodelle für den städtischen Verkehr im Fokus stehen. Diese benötigen geringere Batteriekapazitäten und ziehen somit den Durchschnitt nach unten. Beispielsweise ist das chinesische Modell *HongGuang Mini EV* von *Wuling* mit 13,9 kWh weltweit auf dem zweiten Platz der meistverkauften E-Pkw des Jahres 2022 und wurde insgesamt schon über 1 Mio. mal zugelassen (vgl. STA23a, S. 21, f.) (vgl. XIA23). Kleine E-Fahrzeuge werden aber auch von weiteren Herstellern angeboten. Zum Beispiel der *500e* von *Fiat*, der *Cooper* von *Mini* oder der *Zoe* von *Renault* sowie voraussichtlich ab 2025 der *ID.2* von *Volkswagen*. (vgl. WIE24a)

Mithilfe des Ergebnisses für C_{Min} und $m_{Min} = 0,101 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$ (siehe Kapitel 3.3.1) wird analog zum Szenario S_{Mid} das Lithiumgewicht pro E-Pkw $M_{Min,Netto} = 4,04 \text{ kg}$ bestimmt:

$$M_{Min,Netto} [\text{kg}] = m_{Min} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right] * C_{Min} [\text{kWh}] = 0,101 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} * 40 \text{ kWh} = 4,04 \text{ kg}$$

Maximal-Case-Szenario S_{Max}

Im Gegensatz zu dem Szenario S_{Min} wird hier pauschal eine Erhöhung von $\emptyset C_{E-Pkw}$ um 25% angenommen. Demzufolge wird $C_{max} = 66 \text{ kWh}$ gewählt.

$$C_{Max} = \emptyset C_{E-Pkw} * (1 + 0,25) = 53 \text{ kWh} * 1,25 = 66 \text{ kWh}$$

Dieses Ergebnis berücksichtigt, dass im Szenario S_{Max} überwiegend Langstreckenfahrzeuge mit großen Batteriekapazitäten nachgefragt werden und somit PHEVs substituieren. Aktuell werden bereits E-Pkws mit deutlich höheren Akku-Leistungen als 53 kWh angeboten. Zum Beispiel bieten der *Mercedes EQS*, der *Audi Q8 e-tron* sowie die *BMW* Modelle *iX* und *i7* einen Batteriespeicher von über 100 kWh. Aber auch der *Polestar 2*, *Volvo XC40* und *Volkswagen ID.4* sind mit 82 kWh ausgestattet. Diese und weitere Fahrzeuge der Oberklasse ziehen somit den Durchschnitt im Szenario S_{Max} nach oben. (vgl. WIE24b)

Aus dem spezifischen Gewichtsanteil $m_{Max} = 0,155 \frac{kg}{kWh}$ (siehe Kapitel 3.3.1) wird in Kombination mit der der Batteriekapazität C_{max} der Lithiumbedarf eines E-Fahrzeugs $M_{Max, Netto} = 10,23 kg$ ermittelt:

$$M_{Max, Netto} [kg] = m_{Max} \left[\frac{kg}{kWh} \right] * C_{Max} [kWh] = 0,155 \frac{kg}{kWh} * 66 kWh = 10,23 kg$$

3.3.3 Zusätzlicher Bedarf durch Ausschuss bei der Produktion

Das aus den vorangegangenen Schritten ermittelte Lithiumgewicht pro E-Pkw M_{Netto} kann nicht direkt übernommen und auf den Bedarf beim Hersteller übertragen werden. Denn beim Produktionsprozess von Batteriezellen können Qualitätsmängel entstehen. Diese werden am Ende der Fertigung identifiziert, nachdem die Zelle einen ca. dreiwöchigen Reifeprozess, das sogenannte *Aging*, durchlaufen hat. Währenddessen darf es zu einem Spannungsabfall von maximal 5 mV kommen. Andernfalls besteht die Gefahr eines Kurzschlusses sowie einer Kapazitätsminderung. Die einzelnen Batteriezellen dürfen untereinander nur geringe Differenzen bei der Kapazität aufweisen, um die Lebensdauer der Batterie zu gewährleisten (vgl. KOE22). Die betroffenen Batteriezellen werden als Ausschussteile bezeichnet und können nicht in das E-Fahrzeug eingesetzt werden. Zum jetzigen Zeitpunkt variieren die Ausschussquoten in der Batteriezellfertigung für die E-Mobilität nach Angaben des *Fraunhofer ISI* zwischen ca. 6 - 16 % (vgl. WLZ22). Der *Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau* (VDMA) empfiehlt mindestens mit einem 10%igen Ausschuss zu rechnen (vgl. VDMA23, S. 15). Infolgedessen muss im Vorfeld mehr Lithium beschafft werden, als später tatsächlich im Endprodukt Verwendung findet, um das Defizit auszugleichen. Dieser zusätzlich benötigte Anteil erhöht die Lithiumnachfrage und muss daher im Rahmen der Bedarfsprognose pro E-Pkw berücksichtigt werden. Auf Grundlage der oben genannten Ausschussquote Q wird ein Fehlerkompensationsfaktor F für die definierten Szenarien abgeleitet, welcher anschließend mit dem Lithiumbedarf M_{Netto} multipliziert wird. (vgl. PV23, S. 19 f.)

An dieser Stelle ist anzumerken, dass der Ausschussanteil potenziell durch Recycling im Produktionskreislauf wiederverwendet werden kann. Dies wird nachfolgend im Kapitel 4 aufgegriffen. Dennoch entsteht durch die fehlerhaften Batteriezellen ein Mehrbedarf an Lithium

pro E-Fahrzeug. Daher kann das Recycling die Lithiumverfügbarkeit zwar erhöhen, nicht aber den Bedarf reduzieren. (vgl. ECO22)

Mid-Case-Szenario S_{Mid}

Das Szenario S_{Mid} geht von der Annahme einer durchschnittlichen Fehlproduktion aus. Daher wird der Mittelwert von 6 und 16 % gewählt. Dieser entspricht 11 % und berücksichtigt damit ebenfalls den vom VDMA empfohlenen Mindestsatz von 10 %.

$$Q_{\emptyset} = Q_{Mid} = \frac{1}{2}(6 + 16) [\%] = \frac{22}{2} [\%] = \mathbf{11 \%}$$

$$X = 6; 16 \mid n = 2$$

An dieser Stelle muss beachtet werden, dass es nicht ausreicht, das Einkaufsvolumen von Lithium um 11 % zu erhöhen. Denn eine Ausschussquote $Q_{Mid} = 11 \%$ bedeutet, dass lediglich 89 % der produzierten Batteriezellen für die Batterie brauchbar sind – die sogenannte Ausbeute. Die Berechnung des Fehlerkompensationsfaktors F_{Mid} muss daher ausgehend von diesen 89 % erfolgen. Es stellt sich demzufolge die Frage: Wie hoch muss dieser Faktor gewählt werden, damit bei einem 89%igen Anteil an funktionsfähigen Teilen noch mindestens 100 % des Bedarfs gedeckt werden können?

$$\text{Ausbeute Batteriezellen} [\%] = \text{Bedarfsdeckung} [\%] - \text{Ausschussquote} [\%]$$

$$\text{Ausbeute Batteriezellen} [\%] = 100\% - Q_{Mid} = 100\% - 11\% = \mathbf{89\%}$$

$$\text{Ausbeute Batteriezellen} [\%] * F_{Mid} [\%] = \text{Bedarfsdeckung} [\%]$$

$$89\% * F_{Mid} [\%] = 100\%$$

$$F_{Mid} [\%] = \frac{100\%}{89\%} = \mathbf{112,4\% = 1,124}$$

Anhand der Berechnung wird ein Ausschussfaktor $F_{Mid} = 1,124$ angenommen. Dieser wird anschließend auf den im vorherigen Schritt berechneten Lithiumbedarf pro E-Pkw aufgeschlagen, sodass $M_{Mid} = 7,69 \text{ kg}$ entspricht.

$$M_{Mid} [kg] = m_{Mid} \left[\frac{kg}{kWh} \right] * \emptyset C_{E-Pkw} [kWh] * F_{Mid} [\%] = M_{Mid, Netto} [kg] * F_{Mid} [\%]$$

$$M_{Mid} [kg] = 6,84 \text{ kg} * 1,124 = \mathbf{7,69 \text{ kg}}$$

Minimal-Case-Szenario S_{Min}

Das Szenario S_{Min} definiert eine mögliche Ausprägung der Ausschussquote, die zu einem niedrigen Lithiumbedarf tendiert. Die Fahrzeug- und Batteriehersteller streben eine Erhöhung der Produktionsqualität an, um die dadurch anfallenden Kosten zu reduzieren. Durch eine optimierte und automatisierte Fertigung und die Gewinnung von Erfahrungswerten kann eine Reduzierung des Ausschusses Q_{min} erfolgen. Zum Beispiel können Unebenheiten und Risse in den Folien und Beschichtungen der Batteriezelle so noch frühzeitig vor dem Aging-Prozess

erkannt werden (vgl. POL23). An dieser Stelle wird dafür der untere Grenzwert des *Fraunhofer ISI* von 6 % angenommen (vgl. WLZ22). Die Berechnung des Fehlerkompensationsfaktors F_{Min} erfolgt analog zu dem Vorgehen des Szenario S_{Mid} . (vgl. THI20, S. 14)

$$Q_{Min} = 6\%$$

$$\text{Ausbeute Batteriezellen [\%]} = 100\% - Q_{Min} = 100\% - 6\% = 94\%$$

$$\text{Ausbeute Batteriezellen [\%]} * F_{Min} [\%] = \text{Bedarfsdeckung [\%]}$$

$$94\% * F_{Min} [\%] = 100\%$$

$$F_{Min} [\%] = \frac{100\%}{94\%} = 106,4\% = 1,064$$

Gemäß der Berechnung wird der Fehlerkompensationsfaktor $F_{Min} = 1,064$ für das Szenario S_{Min} festgelegt und mit $M_{Min,Netto}$ multipliziert. Daraus ergibt sich $M_{Min} = 4,3 \text{ kg}$

$$M_{Min} [\text{kg}] = m_{Min} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right] * C_{Min} [\text{kWh}] * F_{Min} [\%] = M_{Min,Netto} [\text{kg}] * F_{Min} [\%]$$

$$M_{Min} [\text{kg}] = 4,04 \text{ kg} * 1,064 = 4,30 \text{ kg}$$

Maximal-Case-Szenario S_{Max}

Das Szenario S_{Max} beschreibt die gegensätzliche Entwicklung eines erhöhten Lithiumbedarfs unter der Annahme, dass den Ursachen der Defekte nicht ausreichend entgegengewirkt werden kann und die Ausbeute geringer ausfällt als im Szenario S_{Mid} . Somit wird hier die hohe Angabe des *Fraunhofer ISI* mit einer Ausschussquote $Q_{Max} = 16\%$ berücksichtigt. Die Ermittlung des zu beachtenden Fehlerkompensationsfaktors F_{Max} erfolgt ebenfalls nach dem Schema der vorangegangenen Szenarien.

$$Q_{Max} = 16\%$$

$$\text{Ausbeute Batteriezellen [\%]} = 100\% - Q_{Max} = 100\% - 16\% = 84\%$$

$$\text{Ausbeute Batteriezellen [\%]} * F_{Max} [\%] = \text{Bedarfsdeckung [\%]}$$

$$84\% * F_{Max} [\%] = 100\%$$

$$F_{Max} [\%] = \frac{100\%}{84\%} = 119,1\% = 1,191$$

Aus der Berechnung geht hervor, dass der Fehlerkompensationsfaktor bei $F_{Max} = 1,191$ liegt. Mithilfe dieses Faktors ergibt sich ein Lithiumbedarf je E-Pkw von $M_{Max} = 12,18 \text{ kg}$.

$$M_{Max} [\text{kg}] = m_{Max} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right] * C_{Max} [\text{kWh}] * F_{Max} [\%] = M_{Max,Netto} [\text{kg}] * F_{Max} [\%]$$

$$M_{Max} [\text{kg}] = 10,23 \text{ kg} * 1,191 = 12,18 \text{ kg}$$

3.4 Entwicklung der Absatzzahlen von E-PKW

Für die Ermittlung des globalen Lithiumbedarfs für die Nutzung im E-Mobilitätsbereich ist anschließend an den individuellen Bedarf pro E-Pkw M_{E-Pkw} das Wachstum des globalen Absatzvolumens A_{E-Pkw} zu analysieren. Dieses wird dabei als dynamische Entwicklung über die Zeit bis zum Zieljahr 2035 betrachtet. Bei der Absatzprognose muss beachtet werden, dass die Entwicklung in den verschiedenen Märkten, also China, Europa und den USA, unterschiedlich verlaufen kann, da dort abweichende Rahmenbedingungen herrschen. Insbesondere finanzieller Wohlstand sowie staatliche Kaufanreize und gesetzliche Vorschriften zur CO₂-Emissionsreduktion stellen die Haupteinflussfaktoren für den E-Pkw-Absatz dar (vgl. FRI23). Im Rahmen dieser Arbeit wird aufgrund der komplexen Bedingungen in den jeweiligen Absatzregionen auf die Erstellung eines Prognosemodells verzichtet. Stattdessen werden drei Szenarien anhand von bereits existierenden Prognosen zu den Neuzulassungen von E-Pkw abgeleitet. Dabei werden sowohl BEVs als auch PHEVs berücksichtigt, aber als E-Pkw zusammengefasst, da dieses Verhältnis von 70:30 bereits als Annahme für die durchschnittliche Batteriekapazität C_{E-Pkw} im Kapitel 3.3.2 definiert ist. Der relative Anteil von E-Autos am gesamten Pkw-Absatz wird nicht separat untersucht, da sich der Gesamtbedarf an Lithium an der absoluten Anzahl der Neuzulassungen orientiert. Die bereits im Kapitel 3.3.2 betrachtete Absatzprognose der DERA liefert alleine nicht genügend Aussagekraft, um den Absatz zuverlässig vorherzusagen. Daher werden darüber hinaus weitere Studien betrachtet und für die Ermittlung eines Gesamtergebnisses gegenübergestellt. (vgl. FRH23) (vgl. FRH18, S. 45 ff.) (vgl. MEF24, S. 209 ff.)

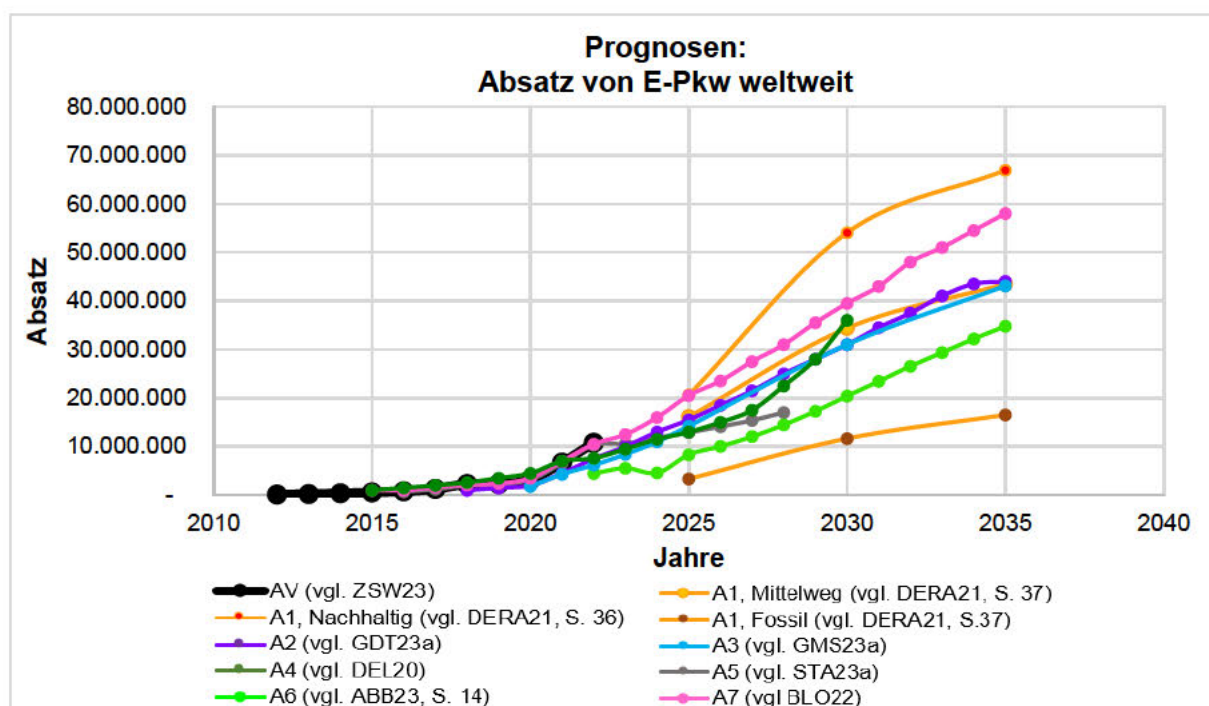


Abb. 3.2: Gegenüberstellung von Absatzprognosen von E-Pkw weltweit

Die obige Abb. 3.2 stellt alle im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Studien innerhalb eines Diagramms gegenüber. Die x-Achse repräsentiert dabei das betrachtete Jahr und die y-Achse den zu erwartenden globalen Absatz von E-Pkw. Der Graph **A_V** verweist auf historische IST-Werte aus den Jahren 2012 bis 2022 hin (vgl. ZSW23). Der Verlauf bis zum Absatz von 10,8 Mio. E-Pkw im Jahr 2022 dient als Referenz für die nachfolgenden Prognosen. Währenddessen zeigen die übrigen Kurven die prognostizierten Neuzulassungen der jeweiligen Studien **A₁** - **A₇** bis maximal zum Jahr 2035. Die Datengrundlage hinter der Abb. 3.2 wurde tabellarisch erstellt und ist dem Anhang A.3.3 zu entnehmen. Die einzelnen Graphen werden nachfolgend kurz vorgestellt.

(A₁) Eine Besonderheit stellen die Kurven **A₁** dar, welche auf Basis des bereits im Kapitel 3.3.2 erwähnten DERA-Szenario *Mittelweg* (**A_{1, Mittelweg}**) sowie *Nachhaltig*²² (**A_{1, Nachhaltig}**) und *Fossil*²³ (**A_{1, Fossil}**) drei mögliche Ausprägungen innerhalb der Prognose veranschaulichen. Die letzteren Beiden bilden die Extremverläufe innerhalb der Darstellung. (vgl. DERA21, S. 36 f.).

(A₂) Die von *Global Data* veröffentlichte Entwicklung des Graphs **A₂** beschreibt ein jährliches Wachstum der E-Mobilität um 26,1 % auf ca. 44 Mio. E-Pkw im Jahr 2035. Damit ähnelt der Kurvenverlauf stark dem von **A_{1, Mittelweg}**. Dies wird durch Maßnahmen zum Ausbau der Ladeinfrastruktur sowie ein gesteigertes Umweltbewusstsein begründet. In diesem Kontext unterstützen Subventionen den Hochlauf in China. In Europa und Amerika werden politische Ziele der Emissionsreduzierung herangezogen. (vgl. GDT23a)

(A₃) Der Verlauf der Kurve **A₃** repräsentiert die Prognose von *Goldman Sachs* und ähnelt ebenfalls **A_{1, Mittelweg}** sowie **A₂**. Das jährliche Wachstum von 32 % auf 44 Mio. E-Autos im Jahr 2035 wird durch Vorgaben zum Klimaschutz und die Optimierung der Technologie von E-Fahrzeugen erwartet. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass der Markt für konventionelle Pkw zurückgeht. (vgl. GMS23)

(A₄) Das Wachstum der Kurve **A₄** beruht auf der Annahme von *Deloitte* und endet mit dem Jahr 2030. Als Grundlage für die jährliche Expansionsrate von 29 % werden staatliche Regularien und die strategische Ausrichtung der Automobilhersteller in Richtung E-Mobilität angegeben. Im direkten Vergleich zu den restlichen Studien kann ein sehr steiler Anstieg der Absatzzahlen abgelesen werden. Die anschließende Weiterentwicklung nach 2030 soll

²² **DERA-Szenario Nachhaltig:** Das Szenario geht davon aus, dass die Menschheit einen nachhaltigen Lebensstil verfolgt und sowohl die vorhandenen Ressourcen, also auch der Energiekonsum reduziert wird. Der weltweite Verkauf von E-Fahrzeugen intensiviert sich. (vgl. DERA21, S. 26, S. 36).

²³ **DERA-Szenario Fossil:** Das Szenario beschreibt eine Entwicklung, bei der sich die Menschheit an den Klimawandel anpasst anstatt diesem entgegenzuwirken. In diesem Zuge werden ökonomische Ziele verfolgt und u.a. die fossilen Rohstoffpotenziale voll ausgeschöpft. Konventionelle Pkw bleiben dominant, während der E-Automarkt langsam wächst. (vgl. DERA21, S. 27, S. 37).

Deloitte zufolge jedoch nicht diesem Verlauf folgen, sondern wieder etwas abflachen, da die Transformation mit hohen Investitionen verbunden sein wird – insbesondere in Bezug auf die erforderliche Ladeinfrastruktur. (vgl. DEL20, S. 6 ff.)

(A₅) Die Prognose von *Statista Market Insights* erwartet ca. 17 Mio. E-Auto-Neuzulassungen im Jahr 2028. Der Anstieg der Kurve A₅ wird auf ein verstärktes Umweltbewusstsein in der Bevölkerung sowie die zunehmende Bereitstellung von Ladeinfrastruktur zurückgeführt. Dennoch wird ein vergleichsweise schleichendes Wachstum angenommen. (vgl. STA23a)

(A₆) Bei der von *Asea Brown Boveri* (ABB) veröffentlichte Prognose zur Nachfrageentwicklung des Automobilmarkts werden an dieser Stelle ausschließlich BEVs und PHEVs berücksichtigt. Der Kurvenverlauf A₆ ist mit dem Endergebnis von ca. 34,9 Mio. E-Autos im Jahr 2035 im Vergleich zu den restlichen Studien eher pessimistisch. Dies kann eventuell auf den weiter zurückliegenden Erhebungszeitraum im Jahr 2021 zurückgeführt werden. Für den Hochlauf werden Fortschritte bei der E-Fahrzeugtechnologie sowie staatliche und herstellerseitige Kaufanreize verantwortlich gemacht. (vgl. ABB21, S. 14)

(A₇) Der Hochlauf der E-Mobilität nach Angaben von *Bloomberg* wird anhand des Graphen A₇ visualisiert. Dabei werden vor allem Gesetzgebungen und eine Kostenreduktion bei den Batterien als Einflussgründe für den ansteigenden Absatz verantwortlich gemacht. Der Verlauf liegt dabei, abgesehen von A_{1, Nachhaltig}, mit 58 Mio. Neuzulassungen im Jahr 2035 oberhalb der übrigen Absatzprognosen. (vgl. BLO22)

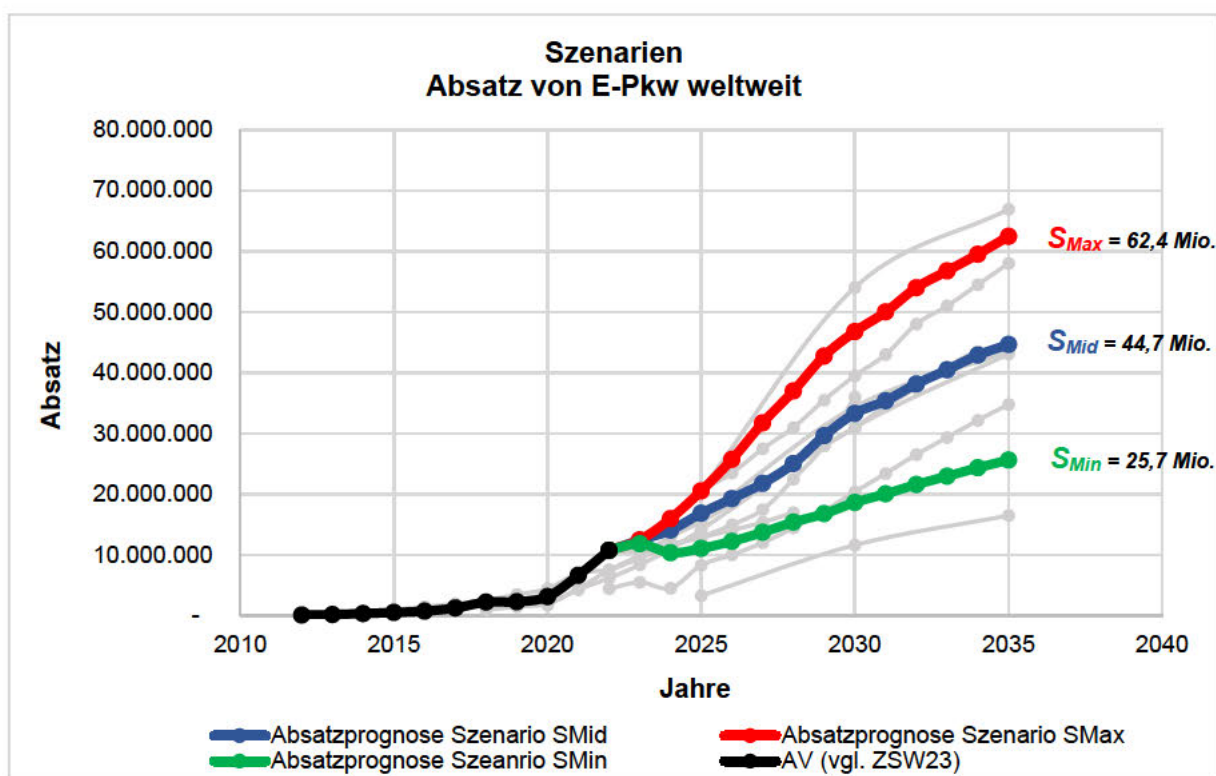


Abb. 3.3: Prognose von Absatzszenarien

Durch den visuell unterstützen, direkten Vergleich werden Parallelitäten sowie Abweichungen zwischen den einzelnen Absatzprognosen sowie den Vergangenheitswerten deutlich. Die teils sehr verschiedenen Entwicklungen können auf die unterschiedlichen Erhebungszeitpunkte (2020 bis 2023) und die jeweiligen Annahmen der Studien zurückgeführt werden. Unter Verwendung dieser Datengrundlage werden eigene Prognosen deduziert. Die Abb. 3.3 erweitert die Visualisierung der verwendeten Absatzkurven aus der Abb. 3.2 um die abgeleiteten Prognose nach den Szenarien S_{Mid} , S_{Min} und S_{Max} . Dabei markiert die Betrachtung der vergangenheitsbezogenen Daten A_V zum E-Pkw-Absatz aus dem Jahr 2022 (10,8 Mio.) den Ausgangspunkt für den Verlauf in den Folgejahren (vgl. ZSW23). Anhand der gewählten Darstellungsform soll der Leser graphisch nachvollziehen können, inwiefern die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Szenarienvläufe in Relation mit den fundierten Studien (grau hinterlegt) stehen. Das Vorgehen zur Festlegung der jeweiligen Absatzentwicklung wird nachfolgend in Abhängigkeit der Szenarien beschrieben.

Mid-Case-Szenario S_{Mid}

Das Szenario S_{Mid} folgt den Erwartungen der bereits existierenden und hier verwendeten Absatzprognosen. Anhand der Abb. 3.3 ist zu sehen, dass sich drei Studien (A_1 , *Mittelweg*, A_2 und A_3) im Verlauf sehr stark annähern und auf den Endwert von ca. 44,7 Mio. Neuzulassungen im Jahr 2035 zulaufen. Daher ist anzunehmen, dass diese Entwicklung aus heutiger Sicht am wahrscheinlichsten eintreten könnte. Zur umfassenden Analyse müssen jedoch die weiteren Studienergebnisse ebenfalls beachtet werden. Daher wird hier der Ansatz gewählt, den Absatz anhand des Durchschnitts aller Kurvenverläufe zu bilden. Lediglich die Prognosen des DERA-Szenarios $A_{1, Nachhaltig}$ sowie $A_{1, Fossil}$ werden für das Szenario S_{Mid} nicht berücksichtigt, da diese bereits Extremfälle und nicht die zu erwartende mittlere Entwicklung beschreiben. Die beiden Graphen werden daher jeweils erst nachfolgend bei den Szenarien S_{Min} und S_{Max} miteinbezogen.

Die Berechnung wurde tabellarisch vorgenommen. Die quantitativen Ergebnisse können dem Anhang A.3.4 entnommen werden. Das Vorgehen zur Ermittlung der Absatzkurve wird anhand der einzelnen ausgeführten Rechenschritte verdeutlicht. Zunächst wird der Durchschnittswert für die Einzeljahre 2022 bis 2035 aus den relevanten Studien gebildet. Die Studien A_1 , *Mittelweg* sowie A_3 beinhalten ausschließlich eine Prognose im Abstand von fünf Jahren (2025, 2030 und 2035). Um diese bei dem Mittelwert der zwischenliegenden Jahre ebenfalls zu berücksichtigen, werden im Vorfeld die Daten der Jahre 2026-2029 sowie 2031-2034 aus den grafisch interpolierten Werten der Abb. 3.2 abgelesen. Zudem muss bei der Berechnung des Mittelwerts die Anzahl n der Studien beachtet werden. Da die Prognose A_1 , *Mittelweg* erst im Jahr 2025 beginnt, A_5 bereits in dem Jahr 2028 abschließt und A_4 im Jahr 2030 endet, variiert n in Abhängigkeit des betrachteten Intervalls.

$$A_{Mid, rechn.}(Jahr) = \frac{1}{n_{Jahr}} \sum Absatz_{Jahr}$$

$$n_{2022-2024} = 6 \mid n_{2025-2028} = 7 \mid n_{2029-2030} = 6 \mid n_{2031-2035} = 5$$

Nach diesem Schema werden die prognostizierten Absatzzahlen $A_{Mid, rechn.}$ pro Jahr berechnet. Da es für das Jahr 2022 bereits einen IST-Absatz $A_{IST}(2022)$ in Höhe von ca. 10,8 Mio. E-Pkw gibt, muss dieser Wert mit den Ergebnissen der Berechnungsmethode verglichen werden (vgl. ZSW23). Dabei wird deutlich, dass eine Differenz Δ_{2022} von ca. 3 Mio. E-Pkw entsteht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass einige Studien bereits vor dem Stichjahr 2022 erhoben wurden und deren Prognose von der tatsächlichen Entwicklung abweicht. Im Rahmen dieser Arbeit muss jedoch der Vergangenheitswert als Startwert für die Entwicklung der Folgejahre angesehen werden, da dieser sicher feststeht und der Realität entspricht. Somit ist das Ergebnis $A_{Mid, rechn.}(2022)$ widerlegt und wird im Jahr 2022 durch $A_{Mid}(2022) = A_{IST}(2022)$ ersetzt. Zudem wird Δ_{2022} ebenfalls im Ganzen auf das erste Prognosejahr 2023 aufsummiert um das Wachstum ausgehend vom Jahr 2022 anzugleichen.

$$A_{Mid, rechn.}(2022) = \frac{1}{6} * \sum Absatz_{2022} = 7.760.500$$

$$A_{IST}(2022) = 10.793.670$$

$$\Delta_{2022} = A_{IST} - A_{Mid, rechn.} = 3.033.170$$

$$A_{Mid}(2022) = A_{IST}(2022) = 10.793.670$$

$$A_{Mid}(2023) = A_{Mid, rechn.}(2023) + \Delta_{2022} = 12.455.337$$

Im Kontext dieser Arbeit wird die Prämisse gesetzt, dass die langfristigen Prognoseergebnisse der Studien $A_1 - A_7$ für das Jahr 2035 nicht von der aktuellen Abweichung im Jahr 2022 beeinflusst werden. Daher wird für das Jahr 2035 $A_{Mid, rechn.}(2035) = A_{Mid}(2035)$ angenommen und das berechnete Ergebnis unverändert übernommen. Nichtsdestotrotz muss die Differenz Δ_{2022} berücksichtigt werden. Daher wird der vereinfachte Ansatz gewählt, Δ_{2022} stufenweise zwischen den Jahren 2023 bis 2035 in linearen Mengeneinheiten abzubauen. Der Abbauzeitraum umfasst 12 Jahre (2023-2035), wobei Δ_{2022} im Jahr 2023 mit 100 % gewertet wird und 2035 zu 0%. In den Zwischenjahren wird daher jeweils das Absatzvolumen von 252.764 E-Pkw (1/12) von der Differenz Δ_{2022} abgezogen, bevor der Restwert auf $A_{Mid, rechn.}$ addiert wird. Durch dieses Vorgehen wird die Abweichung im kurzfristigen Zeithorizont stärker berücksichtigt als im langfristigen Bereich. Der alternative Kurvenverlauf ohne Berücksichtigung der Differenz sowie eine grafische Darstellung des jährlichen Anteils der Differenz Δ_{2022} ist in der Abbaukurve im Anhang A.3.5 abgebildet. Insgesamt berücksichtigt die hier gewählte Modellierung der Prognose des Szenario S_{Mid} sowohl den Vergangenheitsbezug als auch die nach den Studien A_1-A_7 zu erwartende zukünftige Entwicklung.

$$A_{Mid}(2035) = A_{Mid, rechn.}(2035) = 44.671.000 \rightarrow \Delta_{2022} = 0 \%$$

$$A_{Mid}(2023) = A_{Mid, rechn.}(2023) + \Delta_{2022} = 12.455.337 \rightarrow \Delta_{2022} = 100 \%$$

2035 – 2023 = 12 Jahre \rightarrow je $\frac{1}{12}$ wird in den Folgejahren von Δ_{2022} abgezogen

$$\frac{1}{12} * \Delta_{2022} = \frac{3.033.170}{12} = 252.764$$

Beispielrechnung 2024:

$$\Delta_{2024} = \Delta_{2022} - \left(\frac{1}{12}\right) * \Delta_{2022} = 3.033.170 - 252.764 = 2.780.406$$

$$A_{Mid}(2024) = A_{Mid, rechn.}(2024) + \Delta_{2024} = 11.312.381 + 2.780.406 = 14.092.787$$

Beispielrechnung 2034:

$$\Delta_{2034} = \Delta_{2022} - \left(\frac{11}{12}\right) * \Delta_{2022} = 3.033.170 - 2.780.406 = 252.764$$

$$A_{Mid}(2034) = A_{Mid, rechn.}(2034) + \Delta_{2034} = 42.635.800 + 252.764 = 42.888.564$$

Die übrigen Ergebnisse sind in der Tabelle im Anhang A. 3.4 dargestellt. Nach abgeschlossener Berechnung aller Werte $A_{Mid}(2022 - 2035)$ ergibt sich der Graph A_{Mid} in der Abb. 3.3. Für das Jahr 2035 werden nach diesem Vorgehen $A_{Mid}(2035) = 44.671.000$ Neuzulassungen prognostiziert. Der Kurvenverlauf wird in der nachfolgenden Lithium-Bedarfsberechnung als wahrscheinlichste Absatzentwicklung der E-Pkw interpretiert.

Minimal-Case-Szenario S_{Min}

Bei dem Szenario S_{Min} wird ein geringer Hochlauf des E-Pkw-Absatzes bis zum Jahr 2035 angenommen. Die in Abb. 3.3 dargestellte Kurve A_{Min} basiert daher auf dem Durchschnitt der zwei pessimistischsten Studienergebnisse $A_1, Fossil$ und A_6 , welche beide eher einen geringen Absatztrend erwarten. Obwohl die Prognose A_6 ebenfalls einen schwachen Verlauf abbildet, wird diese im Szenario S_{Min} nicht berücksichtigt, da die Daten nur bis zum Jahr 2028 reichen. Der Fokus bei der Ableitung der Absatzvolumen liegt jedoch auf der Entwicklung bis zum Jahr 2035. Die Berechnung des Mittelwertes wird analog zum Szenario S_{Mid} durchgeführt. Da der Prognosehorizont von $A_1, Fossil$ erst im Jahr 2025 beginnt, beruht $A_{Min, rechn.}$ in den vorangegangenen Jahren lediglich auf A_6 .

$$A_{Min, rechn.}(Jahr) = \frac{1}{n_{Jahr}} \sum Absatz_{Jahr}$$

$$n_{2022-2024} = 1 \mid n_{2025-2035} = 2$$

$$\Delta_{2022} = A_{IST} - A_{Min, rechn.} = 6.330.670$$

In diesem Fall entsteht im Basisjahr 2022 ebenfalls eine Abweichung $\Delta_{2022} = 6.330.670$ E-Pkw zwischen $A_{Min, rechn.}$ zu A_{IST} . Die Differenz wird nach demselben Schema wie im Szenario S_{Mid} durch eine lineare Abbaukurve jährlich reduziert und auf das Ergebnis $A_{Min, rechn.}$ addiert (siehe Anhang A.3.5). In der Abb. 3.3 wird die Möglichkeit einer schwachen Entwicklung der Absatzzahlen für E-Pkw grafisch dargestellt und im Rahmen dieser Arbeit als untere Grenze angenommen. Schlussendlich ergibt sich eine Absatzerwartung von $A_{Min}(2035) = 25.652.500$.

Maximal-Case-Szenario S_{Max}

Das Szenario S_{Max} repräsentiert einen starken Hochlauf der E-Mobilität. Demnach wird eine Obergrenze für die Absatzentwicklung bis zum Jahr 2035 aus den zwei optimistischsten vorliegenden Studienergebnissen A_7 sowie $A_1, Nachhaltig$ abgeleitet, wobei letztere erst ab dem Jahr 2025 verwendbare Daten liefert. Für die in Abb. 3.3 dargestellte Kurve A_{Max} wird nach demselben Prinzip wie bei den übrigen Szenarien vorgegangen. Daraus resultiert der Mittelwert $A_{Max, rechn.}(Jahr)$. Für den Zeitraum 2022 bis 2024 werden die Daten von A_7 übernommen. Da beide Studienergebnisse im Jahr 2025 annähernd identisch sind, ist davon auszugehen, dass in diesem Zeitraum die Kurve von A_7 den möglichen Verlauf von $A_1, Nachhaltig$ interpoliert.

$$A_{Max, rechn.}(Jahr) = \frac{1}{n_{Jahr}} \sum Absatz_{Jahr}$$

$$n_{2022-2024} = 1 \mid n_{2025-2035} = 2$$

$$A_{Max, rechn.}(2022) \approx A_{IST}(2022)$$

$$A_{Max} = A_{Max, rechn.}$$

Der direkte Vergleich zwischen $A_{Max, rechn.}(2022)$ und $A_{IST}(2022)$ weist nur eine vergleichsweise geringfügige Abweichung in Höhe von $\Delta_{2022} = 293.670$ E-Fahrzeugen auf. Da diese eventuell auf Ablesefehler bei den in der Studie A_7 angegebenen Werten zurückzuführen ist kann die Differenz vernachlässigt werden. Auf eine Angleichung gemäß dem Vorgehen bei den Szenarien S_{Mid} und S_{Max} wird daher verzichtet. Der Verlauf von A_{Max} wird in der Abb. 3.3 visualisiert und endet bei $A_{Max}(2035) = 62.455.000$ E-Pkw.

3.5 Zusammenführung des prognostizierten Lithiumbedarfs

Abschließend wird in diesem Kapitel der Lithiumbedarf prognostiziert. Die Ergebnisse resultieren aus den in den vorangegangenen Unterkapiteln definierten Einflussparametern:

- Spezifisches Lithiumgewicht in Abhängigkeit der Kapazität $m \left[\frac{kg}{kWh} \right]$
- Batteriekapazität $c_{E-Pkw} [kWh]$
- Fehlerkompensationsfaktor F
- Absatzprognose $A_{E-Pkw}(Jahr)$

Dabei werden m , C_{E-Pkw} sowie F über die Zeit als Konstante betrachtet, während A_{E-Pkw} in Anhängigkeit des Jahres definiert ist. Die Ergebnisse werden in die anfangs festgelegte Formel eingesetzt (siehe Kapitel 3.1), sodass sich der Lithiumbedarf B aus der Multiplikation der genannten Einflussgrößen je Szenario ergibt.

$$B_{E-Pkw}(Jahr)[kg] = m \left[\frac{kg}{kWh} \right] * C_{E-Pkw} [kWh] * F * A_{E-Pkw} (Jahr)$$

Mid-Case-Szenario S_{Mid}

Aus der Kombination der hier berücksichtigten Einflussfaktoren ist ein Anstieg des Lithiumbedarfs auf $B_{2035, Mid} = 343,4 \frac{kt}{Jahr}$ wahrscheinlich. Dies entspricht bei $B_{2022} = 86,8 \frac{kt}{Jahr}$ annähernd einer Vervierfachung (+395,6 %) des Lithiumbedarfs innerhalb von 13 Jahren (vgl. GLI24).

$$B_{Mid}(Jahr)[kg] = m_{Mid} \left[\frac{kg}{kWh} \right] * C_{Mid} [kWh] * F_{Mid} * A_{Mid}(Jahr) = M_{Mid} \left[\frac{kg}{kWh} \right] * A_{Mid}(Jahr)$$

$$B_{2035, Mid}(Jahr)[kg] = 0,129 \frac{kg}{kWh} * 53 kWh * 1,124 * 44.671.000 = 7,69 kg * 44.671.000$$

$$B_{2035, Mid}(Jahr)[kg] = 343.437.795 \frac{kg}{Jahr} = 343,4 \frac{kt}{Jahr}$$

Minimal-Case-Szenario S_{Min}

Der Lithiumbedarf auf Basis des Szenarios S_{Min} nimmt hingegen einen deutlich niedrigeren Wert an. Demnach werden im Jahr 2035 mit $B_{2035, Min} = 110,3 \frac{kt}{Jahr}$ nur knapp ein Drittel im Vergleich zu S_{Mid} nachgefragt.

$$B_{Min}(Jahr)[kg] = m_{Min} \left[\frac{kg}{kWh} \right] * C_{Min} [kWh] * F_{Min} * A_{Min}(Jahr) = M_{Min} \left[\frac{kg}{kWh} \right] * A_{Min}(Jahr)$$

$$B_{2035, Min}(Jahr)[kg] = 0,101 \frac{kg}{kWh} * 40 kWh * 1,064 * 44.671.000 = 4,30 kg * 25.652.500$$

$$B_{2035, Min}(Jahr)[kg] = 110.268.810 \frac{kg}{Jahr} = 110,3 \frac{kt}{Jahr}$$

Maximal-Case-Szenario S_{Max}

Hingegen entsteht nach den Berechnungen des Szenario S_{Max} ein Lithiumbedarf von $B_{2035, Max} = 760,9 \frac{kt}{Jahr}$. Diese Entwicklung entspricht annähernd der doppelten Menge von S_{Mid} sowie mehr als das Siebenfache des aktuellen Bedarfs $B_{2022} = 86,8 \frac{kt}{Jahr}$ (vgl. GLI24).

$$B_{Max}(Jahr)[kg] = m_{Max} \left[\frac{kg}{kWh} \right] * C_{Max} [kWh] * F_{Max} * A_{Max}(Jahr) = M_{Max} \left[\frac{kg}{kWh} \right] * A_{Max}(Jahr)$$

$$B_{2035, Max}(Jahr)[kg] = 0,155 \frac{kg}{kWh} * 66 kWh * 1,191 * 62.455.000 = 12,19 kg * 62.455.000$$

$$B_{2035, Mix}(Jahr)[kg] = 760.947.348 \frac{kg}{Jahr} = 760,9 \frac{kt}{Jahr}$$

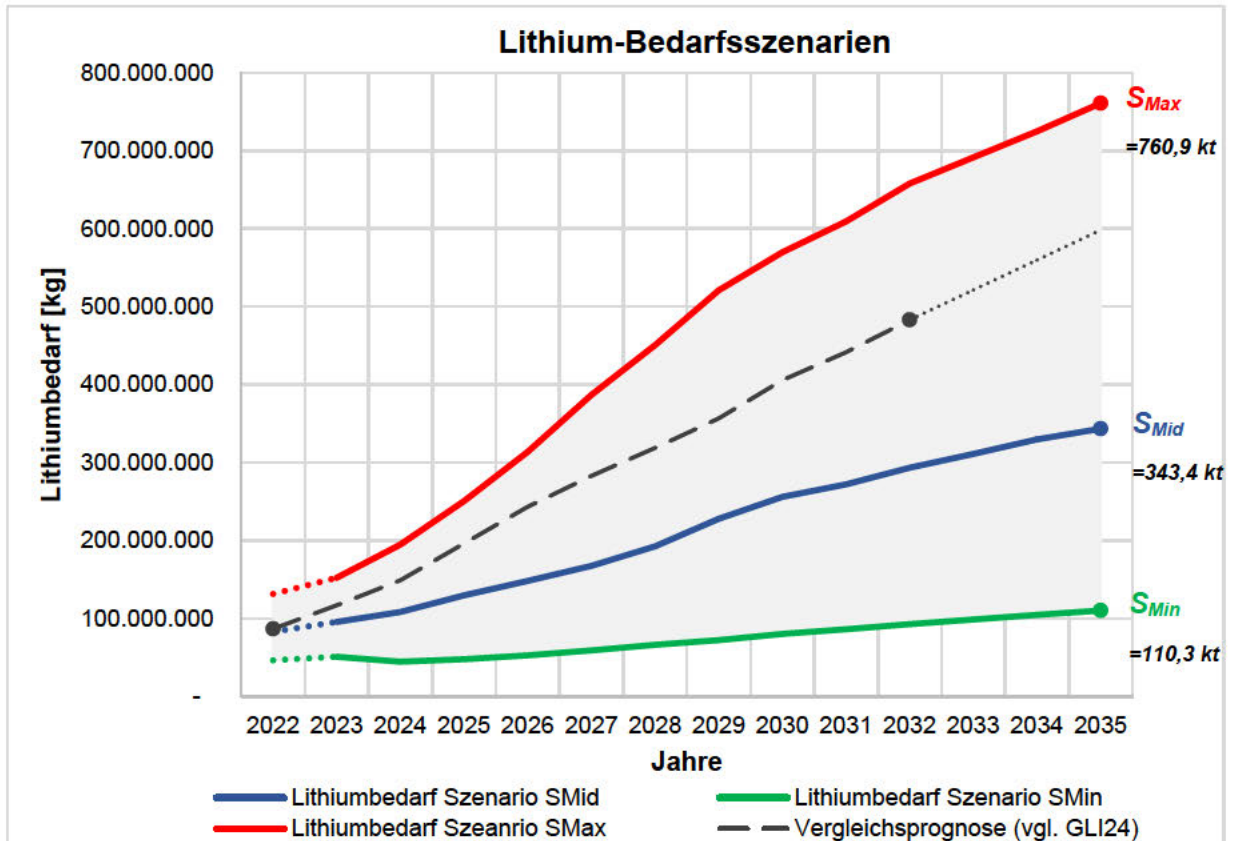


Abb. 3.4: Prognose des Lithiumbedarfs in Abhängigkeit der Szenarien

Die Abb. 3.4 stellt den Gesamtbedarf an Lithium für E-Pkw, differenziert nach den Szenarien S_{Mid} , S_{Min} sowie S_{Max} bis zum Jahr 2035 dar. Die Berechnung wurde tabellarisch durchgeführt und kann vollständig für den gesamten Zeitraum im Anhang A.3.6 nachvollzogen werden. Da das Jahr 2022 im Rahmen dieser Analyse als abgeschlossen betrachtet wird, sind die theoretischen Bedarfsberechnungen gepunktet abgebildet. Die hier angestellte Prognose beläuft sich demzufolge auf den Zeitraum 2023 bis 2035. Insgesamt könnte der Lithiumbedarf durch eine variierende Kombination der ermittelten Einflussfaktoren jeden Wert zwischen den Extremkurvenverläufen S_{Min} und S_{Max} annehmen. Der Bedarf liegt damit innerhalb des grau markierten Korridors, wobei S_{Mid} den wahrscheinlichsten Verlauf widerspiegelt.

Der in dieser Arbeit individuell gewählte Weg zur Bestimmung des Lithiumbedarfs im Rahmen der E-Mobilität wird durch die Gegenüberstellung mit der Prognose von *Global Lithium* validiert. Diese erwartet für das Jahr 2022 einen Lithiumbedarf für E-Pkw von $B_{2022} = 86,8 \frac{kt}{Jahr}$ und liegt somit leicht über dem Wert von $B_{2022, Mid} = 83 \frac{kt}{Jahr}$. Die weitere Entwicklung in den Folgejahren bis 2032 liegt zwischen den hier ermittelten Verläufen der Szenarien S_{Mid} und

S_{Max}. Bei einer linear fortgeführten Extrapolation²⁴ wird im Jahr 2035 $B_{2035, Expl.} = 589 \frac{kt}{Jahr}$ erreicht. Somit liegt der gesamte Kurvenverlauf in dem angenommenen Intervall des Lithiumbedarfs. Dadurch wird die in diesem Kapitel durchgeführte Analyse bestätigt. Die von *Global Lithium* erwartete erhöhte Bedarfsentwicklung im Vergleich zum Szenario **S_{Mid}** könnte auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden. Zum Beispiel eine höhere Gewichtung des Einzelbedarfs pro E-Auto oder einen steileren Anstieg des globalen Absatzvolumens. Für eine Auswertung der Ergebnisse müssen diese zunächst mit der Verfügbarkeit von Lithium auf dem Weltmarkt gegenübergestellt werden. Dieser Untersuchung widmet sich das nachfolgende Kapitel 4. Im Anschluss erfolgt eine Gegenüberstellung und Interpretation der Ergebnisse im Kapitel 5. (vgl. GLI24)

²⁴ **Extrapolation der Vergleichsprognose:** (vgl. KUE23, S. 165 ff.)

$$\text{ØSteigung } a = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y(2032) - y(2021)}{2032 - 2021} = \frac{483,02 \text{ kt} - 60,57 \text{ kt}}{11 \text{ Jahre}} = 38,4 = 626,8 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}}$$

$$y(2033) = y(2032) + a = 483,02 = 626,8 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} + 38,4 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} = 521,42 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}}$$

$$y(2034) = y(2032) + 2 * a = 483,02 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} + 2 * 38,4 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} = 559,83 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}}$$

$$y(2035) = y(2032) + 3 * a = 483,02 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} + 3 * 38,4 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} = 598,23 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}}$$

4 Ressourcenverfügbarkeit von Lithium bis 2035

Im Anschluss an die Bedarfsermittlung für E-Pkw im Kapitel 3 wird nachfolgend die globale Verfügbarkeit des Rohstoffs Lithium untersucht. Dabei müssen zunächst die relevanten Begriffe *Ressource* und *Reserve* definiert und voneinander abgegrenzt werden. Die Bezeichnung *Ressource* beschreibt alle nach aktuellem Kenntnisstand entdeckten weltweiten Rohstoffvorkommen. Dabei ist der Ort, die prozentuale Konzentration sowie die Menge bekannt. Zudem besteht die Möglichkeit diese aktuell oder perspektivisch abzubauen. Das Gesamtvolumen einer Ressource wird durch bisher unentdeckte Vorkommen, also bei Neufunden, erweitert. (vgl. USGS20, S. 195 f.) (vgl. FTZ23, S. 23 f.)

Demgegenüber beschreibt eine *Reserve* den Anteil einer Ressource, der aktuell ökonomisch erschließbar ist. Daher erfolgt neben den technischen Aspekten (Verfahren zur Rohstoffgewinnung, anteiliger Gehalt in den Böden, sowie die Tiefe bzw. Erreichbarkeit) auch eine Bewertung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Abbaus. Dabei werden die potenziellen Kosten der Aufbereitung und des Vertriebs abgeschätzt und anschließend dem Nutzen in Abhängigkeit von der aktuellen Marktlage gegenübergestellt. Wenn ein rohstoffreiches Gebiet die Voraussetzungen erfüllt, werden die vorhandenen Vorkommen als Reserve eingestuft. Diese Anforderungen sowie die Nachfrage eines Rohstoffs ändern sich regelmäßig. Zudem können neue Ressourcen entdeckt werden. Demnach stellt sich ein fortlaufender Prozess der Klassifikation und Einstufung neuer Reserven ein. Jedoch bedeutet die Möglichkeit eines profitablen Abbaus nicht automatisch, dass dieser bereits umgesetzt wird. Insgesamt wird der Reservenstand durch den Betrieb einer Minenproduktion in den jeweils gewonnenen Mengen reduziert und steht damit für die Versorgung des Markts zur Verfügung. (vgl. USGS20, S. 195 f.) (vgl. FTZ23, S. 23 f.)

Auf Grundlage dieser Begriffsdifferenzierung wird folgend die aktuelle Datenlage der identifizierten Lithiumressourcen und -reserven untersucht. Anschließend erfolgt eine Prognose der Bereitstellung des Rohstoffs auf Basis der Minenproduktion sowie optionaler Recyclingpotenziale. In diesem Zusammenhang wird von einer *Primär-* bzw. *Sekundärrohstoffquelle* gesprochen (vgl. BMWK24b). Die Ergebnisse werden abschließend in Relation gestellt und eine Annahme zur gesamten globalen Verfügbarkeit bis zum Jahr 2035 getroffen.

4.1 Aktuelle Lithiumressourcen und -reserven

Zunächst wird untersucht, wie die Ressource Lithium geografisch auf der Erde verteilt ist. Die Identifikation der weltweit wichtigsten Vorkommen trägt dazu bei, eine Übersicht über die potenzielle Lithiumverfügbarkeit zu erhalten.

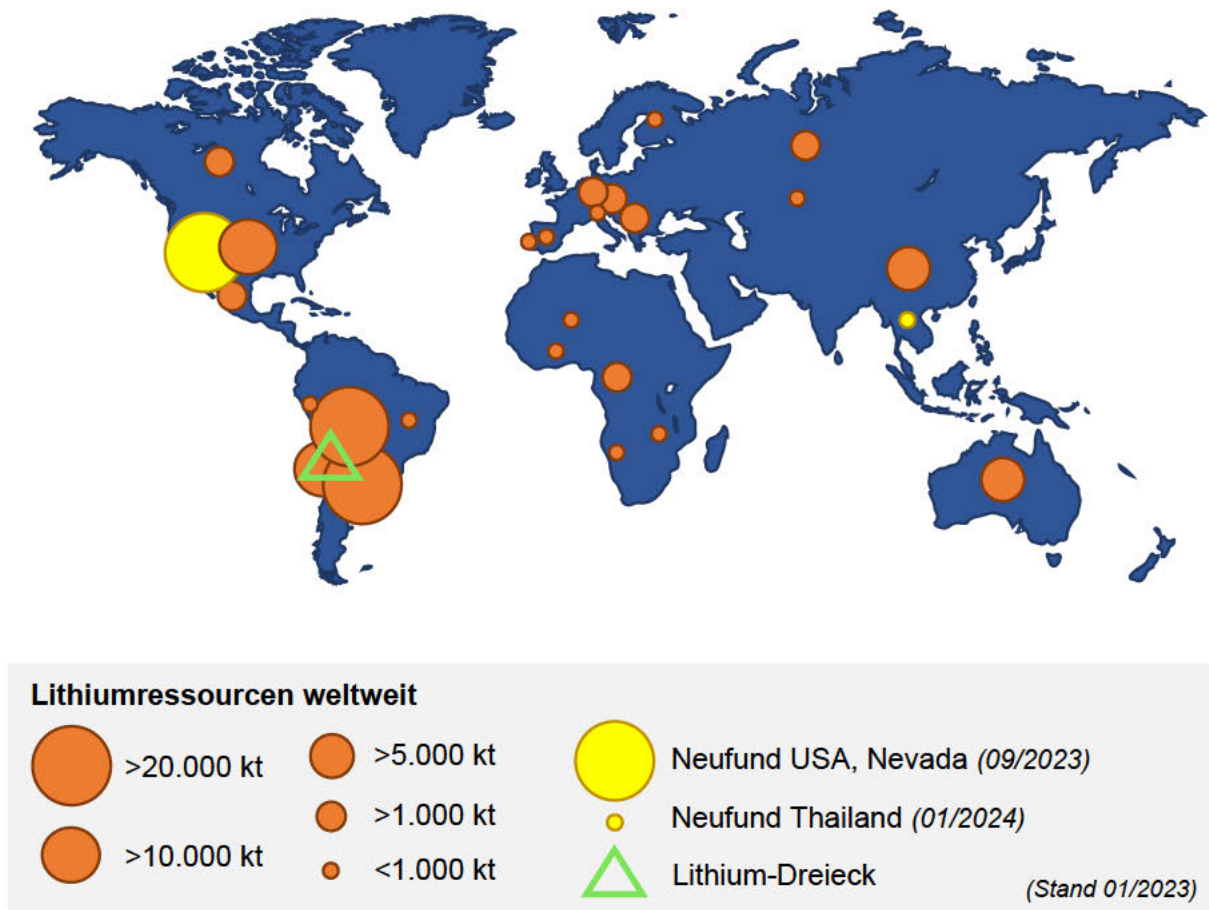


Abb. 4.1: Weltkarte mit Darstellung der Lithiumressourcen (vgl. USGS23, S. 2)

Die Abb. 4.1 stellt die globale geografische Verteilung der Lithiumressourcen dar (Stand 01/2023). Dabei werden die 24 Staaten mit den größten Vorkommen berücksichtigt – ergänzt durch einen Neufund in den USA sowie Thailand – und nach dem jeweiligen Volumen differenziert. Die Daten basieren auf einer Veröffentlichung der USGS und belaufen sich in Summe auf ca. 98.000 kt (Stand 01/2023). Die genauen Angaben zu den jeweiligen Staaten sind tabellarisch im Anhang A.4.1 aufgeführt. (vgl. USGS23, S. 2)

Aus der Darstellung geht hervor, dass die größten Ressourcen aktuell in Südamerika zu finden sind. Die Grenzregion zwischen Bolivien (21.000 kt), Argentinien (20.000 kt) und Chile (11.000 kt) wird deshalb auch als *Lithium-Dreieck* bezeichnet (vgl. BGT23). Dort lagert mehr als die Hälfte (53,1 %) des derzeit weltweit bekannten Lithiums. Die USA verfügen bislang mit 12.000 kt nach Bolivien und Argentinien über die drittgrößten globalen Vorkommen (12,2 %). Jedoch könnte ein im September 2023 veröffentlichter Neufund, der bislang nicht von der USGS berücksichtigt wird, das Land als Spitzenreiter bei den Lithiumressourcen positionieren. In dem Bundesstaat Nevada, im McDermitt Caldera, werden zusätzliche 20.000 bis 40.000 kt Lithium vermutet. (vgl. USGS23, S. 2) (vgl. REY23) (vgl. KNO23)

Nach den USA belaufen sich die Bestände in Australien auf 7.900 kt (8,1 % – ohne Berücksichtigung des Neufunds in den USA) und China auf 6.800 kt (6,9 %). In Europa existieren in den Ländern Deutschland, Tschechien, Serbien, Spanien, Portugal sowie Österreich zusammengefasst ca. 6.3500 kt Lithium (6,5 %). Die restliche Ressourcenverteilung (insgesamt 13,2 %) kann im Anhang A.4.1 nachvollzogen werden. (vgl. USGS23, S. 2)

Ergänzend ist anzumerken, dass derzeit aufgrund der hohen Nachfrage im Bereich der E-Mobilität ein großes Interesse an der Lokalisation neuer Lithiumressourcen besteht. Im Hinblick auf die Ergebnisse des prognostizierten Lithiumbedarfs (siehe Kapitel 3) ist davon auszugehen, dass die Anstrengungen zur Identifikation weiterer Vorkommen sowohl aktuell als auch in Zukunft intensiviert werden. Allein zwischen den Jahren 2020 und 2023 wurde der Stand zu den weltweiten Lithiumressourcen von 80 Mio. t auf 98 Mio. t aktualisiert, was einer Steigerung von 22,5 % entspricht (vgl. USGS20, S. 99) (vgl. USGS23, S. 2). Da die Entdeckung in den USA dabei noch nicht berücksichtigt wird, könnten die globalen Ressourcendaten auf 118.000 bis 138.000 kt angehoben werden, was einer weiteren Erhöhung der Ressource von 20,4 bis 40,8 % innerhalb eines Jahres entspricht. Infolgedessen kann davon ausgegangen werden, dass der aktuelle Wissensstand zu den Lithiumvorkommen auch in den kommenden Jahren einer ständigen Änderung unterliegt und bis zum Jahr 2035 weiter zunimmt.

Die Identifikation neuer Quellen wird auch in Regionen vorangetrieben, die aktuell noch keinen Lithiumabbau betreiben. Zum Beispiel wird im Januar 2024 ein Fund von 14,8 Mio. t Lithium in Thailand bekannt gegeben. Dieser soll für die Fertigung von E-Pkw-Batterien verwendet werden, da Thailand eine Transformation der Automobilindustrie in Richtung E-Mobilität anstrebt (vgl. MSC24). Jedoch wurde die Entdeckung nach der vorläufigen Proklamation als weltweit drittgrößtes Vorkommen nach wenigen Tagen auf 66,6 kt korrigiert, da der Anteil im Lepidolith lediglich bei ca. 0,45 % liegt. Demnach sind Meldungen neuer Funde immer vorläufig, da es sich bei den Angaben zunächst um Schätzungen handelt. Insbesondere die prozentuale Konzentration sowie die Art der Lithiumverbindung mit anderen Elementen muss untersucht werden, um die Erschließung und potenziell vorhandene Ausbeute beim Abbau sicher bestimmen zu können. (vgl. TSB24) (vgl. KBS24)

Die Ressourcen zeigen an, wieviel Lithium in den jeweiligen Ländern vorhanden ist. Jedoch ist damit nicht automatisch gewährleistet, dass die Vorkommen auch vollumfänglich erschlossen werden können. Aus diesem Grund ist eine Betrachtung der bislang validierten, ökonomisch nutzbaren Reserven notwendig. Diese umfassen aktuell weltweit insgesamt ca. 26.000.000 kt (Stand 01/2023) (vgl. USGS23, S. 2).

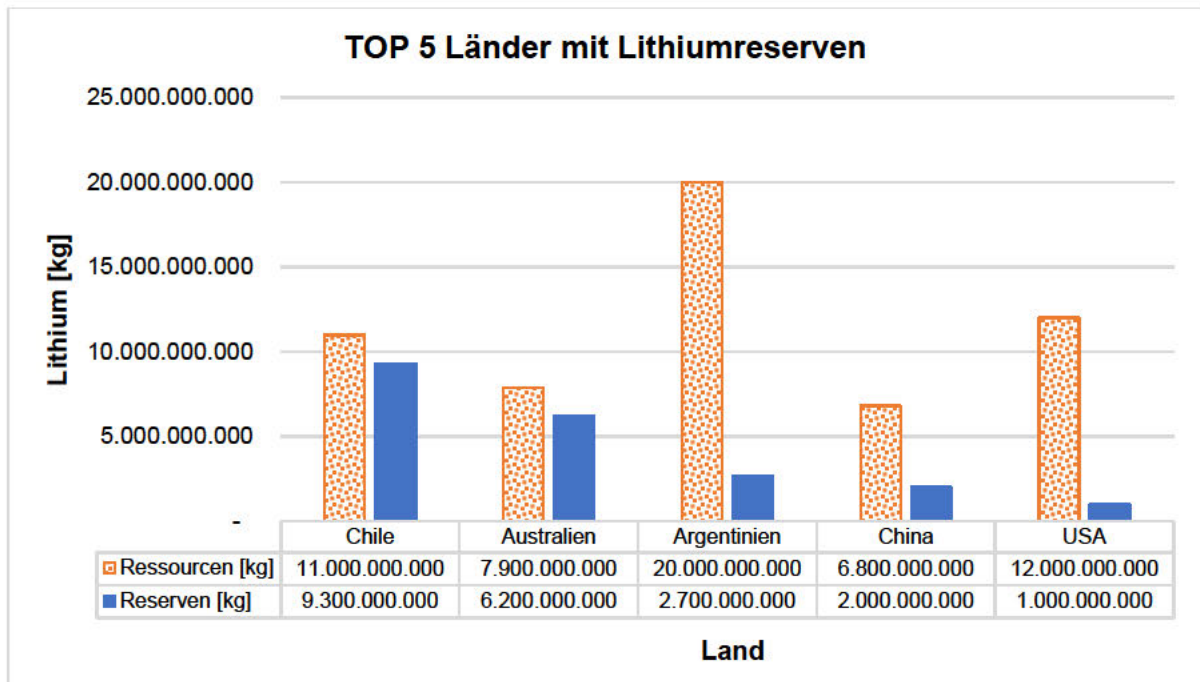


Abb. 4.2: TOP 5 Länder mit den größten Lithiumreserven (Stand 2022) (vgl. USGS23)

In der Abb. 4.2 sind die fünf Länder mit den weltweit größten Lithiumreserven dargestellt. Dazu zählen in absteigender Rangfolge: Chile, Australien, Argentinien, China sowie die USA. Diese verfügen in Summe über 21.200 kt (81,5 %) der weltweiten Reserven. Die hier verwendeten Daten sind von der USGS übernommen (Stand 01/2023). Die vollständige Tabelle inklusive der restlichen Regionen kann im Anhang A.4.1 eingesehen werden. Die Balken zeigen neben den Reserven auch einen direkten Vergleich zu den vorhandenen Ressourcen des jeweiligen Gebiets an. Daraus geht hervor, dass Chile nicht nur die weltweit größten Lithiumreserven beherbergt (9.300 kt), sondern dabei auch mit 84,5% die höchste Verfügbarkeitsquote²⁵ aufweist – im globalen Durchschnitt liegt das Verhältnis von Reserven zu Ressourcen lediglich bei 26,5 %. In Zukunft können hingegen perspektivisch weitere Ressourcen geprüft und als neue Reserve deklariert werden. Während im Jahr 2020 ca. 17.000 kt bekannt sind, steigt dieses Volumen im Jahr 2023 auf 26.000 kt, was einem Wachstum von 52,9 % entspricht (vgl. USGS20, S. 99). Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass in den kommenden Jahren eine weitere Erhöhung der Lithiumreserven absehbar ist. Diese werden jedoch durch ein Fortschreiten des Abbaus verringert. (vgl. USGS23, S. 2).

Die zukünftige Entwicklung der Lithiumvorkommen ist schwer vorhersehbar. Teilweise hat es sich in der Vergangenheit dabei sogar um Zufallsfunde gehandelt (vgl. VOG22). Im Rahmen

²⁵ **Verfügbarkeitsquote:** Verhältnis zwischen Reserve und Ressource, hier: *Chile*.

$$\text{Verfügbarkeitsquote}_{\text{Chile}} [\%] = \frac{\text{Reserven}_{\text{Chile}}}{\text{Ressourcen}_{\text{Chile}}} = \frac{9.300 \text{ kt}}{11.000 \text{ kt}} = 84,5 \%$$

dieser Arbeit wird daher auf eine Untersuchung und Prognose der weiteren Ressourcen- und Reservenentwicklung bis 2035 verzichtet und stattdessen das zu erwartende Wachstum der Lithiumproduktion betrachtet.

4.2 Primärversorgung durch Lithiumabbau

Das Vorhandensein von großen Lithiumressourcen und -reserven bedeutet nicht direkt, dass auch eine ausreichende Menge abgebaut und auf dem Markt angeboten wird. Für die Ermittlung der tatsächlichen Verfügbarkeit ist insbesondere die Lithiumproduktion der betriebenen Minen relevant. Aus der Analyse der jährlich zu erwartende Fördermenge von Lithium kann im weiteren Verlauf eine Vergleichbarkeit des Abbauvolumens zum Nachfragevolumen geschaffen werden.

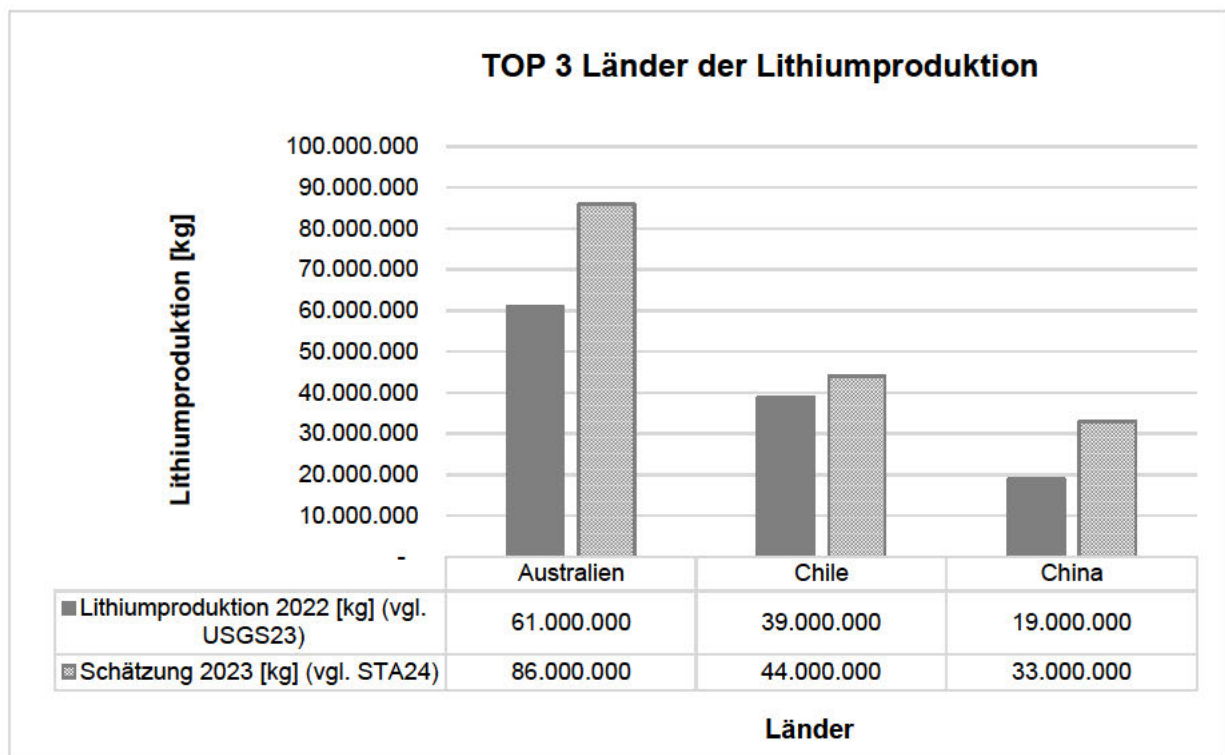


Abb. 4.3: TOP 3 Länder mit höchster Lithiumproduktion im Jahr 2022 und 2023 (vgl. USGS23) (vgl. STA24)

Die derzeitige Lithiumproduktion wird zu 92 % von den Ländern Australien, Chile und China getragen und umfasst nach Angaben der USGS insgesamt 130 kt (siehe Abb. 4.3) (Stand 2022) (siehe Anhang A.4.1). Die hohen Produktionsanteile dieser Länder werden sich bis zum Jahr 2030 nicht signifikant ändern. Kritisch anzumerken ist, dass die USA aus Wettbewerbsgründen keine Daten zur inländischen Lithiumproduktion veröffentlicht und die Datenlage aus China unvollständig ist. Infolgedessen kann abgeleitet werden, dass das tatsächliche globale Angebot über den offiziellen Angaben von 130 kt liegt. Zusätzlich zu den Daten aus dem Jahr 2022 hat *Statista* eine vorläufige Schätzung für das ebenfalls abgeschlossene Jahr 2023 abgegeben. Dabei wird ein Produktionsvolumen von 184,7 kt

angenommen. Argentinien, Chile und China würden demnach mit etwa 88,3 % immer noch den größten Teil der weltweiten Abbauaktivitäten von Lithium verantworten. (vgl. USGS23, S. 2) (vgl. DERA23, S. 67).

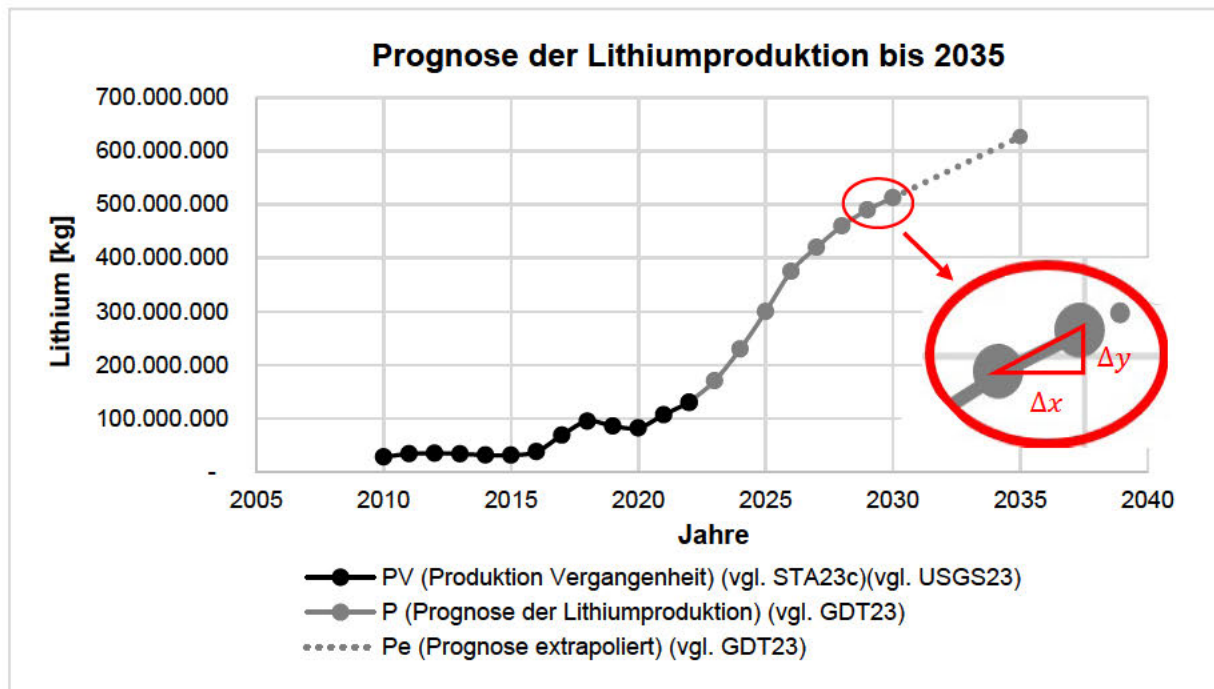


Abb. 4.4 Kurvenverlauf der Lithiumproduktion von 2010 bis 2035 (vgl. STA23c) (vgl. GDT23)

In der Abb. 4.4 visualisiert der Graph P_V die zurückliegende globale Lithiumproduktion der Jahre 2010 bis 2022 laut den Angaben von *Statista* und USGS (Datengrundlage siehe Anhang A.4.3). Diese wird durch eine Prognose P bis zum Jahr 2035 ergänzt. Die dargestellte zukünftige Entwicklung der Lithiumproduktion bis zum Jahr 2030 basiert auf einer von *Global Data* veröffentlichten Einschätzung. Diese knüpft an die vergangenheitsbezogene Produktion von 130,4 kt²⁶ aus dem Jahr 2022 an und erwartet insgesamt eine Steigerung um 393 % – also auf 512,8 kt – im Jahr 2030. Die Entwicklung der Produktionskapazitäten folgt demnach einem positiven Trend. Nach Angaben von *Global Data* tragen vor allem die Abbauaktivitäten in Australien und Argentinien einen hohen Anteil zu einer voraussichtlichen jährlichen Wachstumsrate von im Schnitt 13,9% bis 2030 bei. (vgl. STA23b) (vgl. USGS23) (vgl. GDT23b)

²⁶ **Lithiumproduktion 2022:** *Global Data* geht davon aus, dass im Jahr 2022 ca. 130,4 kt Lithium produziert wurden. Dieser Wert liegt somit leicht über den Angaben von USGS und Statista (130 kt). Im Rahmen dieser Arbeit wird folgend das Ergebnis von *Global Data* verwendet, da es sich hinsichtlich des Veröffentlichungsdatums um den aktuellsten Stand handelt. (USGS 01/23, Statista 02/23, *Global Data* 11/23) (vgl. GDT23b) (vgl. STA23b) (vgl. USGS23, S. 2).

Die kurzfristige Erhöhung der Abbaukapazitäten bis zum Jahr 2023 (170,8 kt bei einem Wachstum um 31,3 %) beruht vorwiegend auf den zusätzlichen Potenzialen des zu erwartenden Produktionsbeginns der folgenden Projekte: (vgl. GDT23b)

- Wodgina (Australien) ab 06/2022
- Mount Finniss (Australien) ab 02/23
- Zulu (Simbabwe) ab 02/2023
- Arcadia (Simbabwe) ab 03/2023

Aufgrund der Publikation im November 2023, wird die Prämisse gesetzt, dass die hier verwendete Prognose von *Global Data* zum jetzigen Zeitpunkt nach wie vor aussagekräftige Ergebnisse liefert. Aus diesem Grund wird der Kurvenverlauf zur Abschätzung der Primärproduktion P übernommen. Weitere Quellen mit älteren Datenständen werden nicht berücksichtigt. Die Untersuchung der Lithiumressourcen und -reserven im vorangegangenen Kapitel zeigt, dass der Lithiummarkt sehr dynamisch ist und innerhalb kürzester Zeit deutliche Anstiege erfasst werden. Demzufolge liefern aktuelle Daten zuverlässigere Vorhersagen als weiter Zurückliegende. (vgl. STA24) (vgl. GDT23b)

Anzumerken ist, dass der Prognosezeitraum von *Global Data* mit Ablauf des Jahres 2030 endet. Um jedoch die Entwicklung bis zum Jahr 2035 ebenso in die Untersuchungen dieser Arbeit einbeziehen zu können, wird der weitere Verlauf P_e auf Basis der vorhandenen Werte extrapoliert (siehe Abb. 4.4). Nach Kühnappel ist in diesem Zusammenhang die Anwendung verschiedener Berechnungsmethoden für eine Prognose möglich. Die Wahl eines passenden Ansatzes hängt dabei von der Art des Zusammenhangs der vorliegenden Daten ab – also zum Beispiel, ob es sich um eine lineare oder exponentielle Kurve handelt (siehe Kapitel 2.4). Die darauf aufbauende Prognose stützt sich auf die Wahl eines Ausgangspunkts, welcher direkt an den letzten vorhandenen Wert anknüpft – in diesem Fall das Jahr 2030 mit einer Lithiumproduktion von 512,8 kt. Von da aus wird vereinfacht ein lineares Fortschreiten der bisherigen Entwicklung angenommen und eine Steigung für die Gerade bestimmt. (vgl. GDT23b) (vgl. KUE23, S. 165 ff.)

Da *Global Data* eine Entwicklung annimmt, die zum Ende der betrachteten Periode leicht abflacht und somit nicht linear verläuft, wird von Kühnappel empfohlen, die Steigung nicht aus dem Durchschnitt aller vorhandener Werte abzuleiten. Stattdessen wird angeraten, nur einen Teilbereich mit einfließen zu lassen. Andernfalls würde das Ergebnis ein erhöhtes Wachstum abbilden, das nicht mehr dem eigentlichen Trend der Kurve entspricht (alternativer Kurvenverlauf bei durchschnittlicher Steigung siehe Anhang A.4.2). Eine Verwendung aller Werte sei demnach nur bei konstanten Rahmenbedingungen und stabilen Verläufen sinnvoll. Die Prognose der Produktion von Lithium erfüllt diese Voraussetzungen jedoch nicht, da die

verantwortlichen Einflussfaktoren (u. a. eventuelle Neufunde, Wirtschaftlichkeitsbewertung) nicht eindeutig zu bestimmen sind und kein konstanter Produktionsanstieg angenommen wird. (vgl. KUE23, S. 165 ff.)

Aus diesem Grund wird der weitere Verlauf der Kurve **P** im Intervall 2030 bis 2035 extrapoliert. Dafür wird vereinfacht die lineare Steigung zwischen den beiden Schlussjahren 2029 und 2030 bestimmt. Das rechnerische Ergebnis von $a = 22,8$ wird anschließend vom Ausgangsjahr 2030 ($512,8 \frac{kt}{Jahr}$) als Gerade P_e bis 2035 modelliert, sodass in diesem Jahr eine Primärproduktion in Höhe von ca. $626,8 \frac{kt}{Jahr}$ (+480,6%) erwartet wird. (vgl. GDT23b) (vgl. KUE23, S. 165 ff.)

$$y = \text{Lithiumproduktion [kg]} \mid x = \text{Jahr}$$

$$y(x_{2030}) = 512,8 \frac{kt}{Jahr} \rightarrow \text{Ausgangspunkt}$$

$$\text{Steigung } a = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y(2032) - y(2021)}{2032 - 2021} = \frac{512,8 \text{ kt} - 490 \text{ kt}}{1 \text{ Jahr}} = \frac{22,8 \text{ kt}}{1 \text{ Jahr}} = 22,8 \frac{kt}{Jahr}$$

$$y(x_{2035}) = y(x_{2030}) + a * \Delta x$$

$$y(x_{2035}) = 512,8 \frac{kt}{Jahr} + 22,8 \frac{kt}{Jahr} * (2035 - 2030) = 512,8 \frac{kt}{Jahr} + 22,8 \frac{kt}{Jahr} * 5$$

$$y(x_{2035}) = 626,8 \frac{kt}{Jahr}$$

Insgesamt kann in den kommenden Jahren eine kontinuierliche Steigerung der globalen Produktionskapazitäten erwartet werden. Der Trend der Prognose von *Global Data* wird durch die Bekanntgabe der geplanten Starts von weiteren Projekten im Lithiumabbau unterstützt. Insgesamt erfasst die DERA allein bis zum Jahr 2030 durch 50 geplante Abbauprojekten ein weltweit zusätzliches Produktionsvolumen von ca. $294 \frac{kt}{Jahr}$ Lithium. Dieses soll durch Neuaufnahmen, Wiederaufnahmen, Erweiterungen bestehender Minen und weitere Vorhaben realisiert werden (Stand 2023). (vgl. GDT23) (vgl. DERA23, S. 48 ff.)

Folgend werden daher ausgewählte Beispiele für neue Vorhaben in den wichtigsten Produktionsstandorten Australien, Chile und China sowie zukünftig verstärkt auch Argentinien kurz aufgezeigt. Diese werden anschließend durch die Pläne der – neben China – wichtigsten E-Mobilitätsmärkte USA und Europa ergänzt (Stand 2023):

- **Australien:** Der laufende Betrieb in den Minen *Greenbushes*, *Wodgina*, *Pilgangoora*, *Bald Hill* und *Mt. Marion* soll erweitert werden. Zusätzlich sind drei weitere Minen im Bau

und ein Projekt befindet sich im Status *Definitive Feasibility Study* (DFS, dt.: Endgültige Machbarkeitsstudie)²⁷. Insgesamt könnten in den kommenden Jahren jährlich zusätzlich bis zu 127 kt Lithium abgebaut werden. (vgl. DERA23, S. 48 ff.)

- **Chile:** Nach Angaben der DERA verfolgt das Land bereits seit 2017 Strategien, um die dortige Lithiumproduktion zu intensivieren. Dabei soll der Rohstoff zu günstigen Konditionen angeboten werden, unter der Bedingung, dass die Investoren wertschöpfende Industrie in dem Land aufbauen – zum Beispiel die Fertigung von Batteriekomponenten. In der Vergangenheit sind die Bemühungen jedoch aufgrund von fehlendem Interesse der Firmen, politischen und sozialen Konflikten vorerst ausgebremst worden. Nichtsdestotrotz sollen perspektivisch in der *Salar de Atacama* sowie durch das DFS-Projekt *Maricunga* weitere 21,6 kt im Jahr bereitgestellt werden können (vgl. DERA23, S. 46 ff.)
- **China:** Der DERA sind derzeit keine konkreten Pläne zur Produktionssteigerung bekannt. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass ein Zugriff auf chinesische Informationen nicht vollumfänglich möglich ist. Nichtsdestotrotz investiert China stark in Abbaubetriebe in den ausländischen Produktionsstandorten und kontrolliert aktuell mehr als die Hälfte aller Minen weltweit (vgl. HAE23). Beispielsweise soll der Staat bereits in den Neufund in Thailand (siehe Kapitel 4.1) investieren, sodass möglicherweise bereits 2026 ein jährlicher Abbau von 10 kt umgesetzt werden könnte (vgl. MSC24). Nach der deutlichen Reduzierung des tatsächlichen Lithiumvorkommens (siehe Kapitel 4.1) ergibt sich eventuell auch nur ein geringerer jährlicher Produktionsumfang als 10 kt. (vgl. TSB24) (vgl. KBS24) (vgl. DERA23, S. 48 ff.)
- **Argentinien:** In Übereinstimmung mit der Prognose von *Global Data* geht auch die DERA davon aus, dass Argentinien zukünftig einen der wichtigsten Treiber für die Erhöhung der Lithiumproduktion darstellen wird. In dem Land könnten durch Erweiterungen und neue Bauvorhaben an acht Produktionsstandorten sowie die Realisierung von zwei weiteren DFS und einer *Pre-Feasibility Study* (PFS, dt.: Vor-Machbarkeitsstudie)²⁸ künftig pro Jahr weitere 60 kt Lithium abgebaut werden. (vgl. GDT23) (vgl. DERA23, S. 48 ff.)
- **USA:** Wie bereits thematisiert werden derzeit keine validen Daten zur Lithiumproduktion in den USA publiziert (vgl. GDT23). Jedoch könnte in der vermutlich weltweit größten Lithiumquelle, im kürzlich entdeckten McDermitt-Caldera (siehe Kapitel 4.1), bereits im

²⁷ **DFS:** Endergebnis einer Machbarkeitsstudie, die bei der Projektentwicklung von Bergbauvorhaben durchgeführt wird und ein wichtiges Entscheidungskriterium für die Umsetzung darstellt. Dafür werden vor allem technische und wirtschaftliche Kriterien untersucht, aber auch ökologische und soziale Auswirkungen einer möglichen Projektrealisierung berücksichtigt. (vgl. LYA23)

²⁸ **PFS:** Vorstufe der DFS. beinhaltet Basisinformationen (u.a. geologische Daten, Kosten und Herausforderungen) über Bergbauprojekte, die den Entscheidungsträgern helfen, einen Überblick über das Vorhaben zu erhalten. (vgl. PSI23)

Jahr 2026 mit dem Abbau begonnen werden (vgl. REY23). Aufgrund der hohen Konzentration von bis zu 2,4% Lithium im Vulkangestein ist anzunehmen, dass eine erhebliche Ausbeute erwartet werden kann (vgl. STL23b). Außerdem veröffentlicht die DERA, dass ein Potenzial von etwa 23 kt pro Jahr bei der Umsetzung einer PFS, einer DFS sowie zwei weiteren *Feasibility Studies* (FS, dt.: Machbarkeitsstudie)²⁹ entstehen könnte (vgl. DERA23, S. 48 ff.).

- **Europa:** Der Kontinent spielt aktuell keine große Rolle bei der Lithiumversorgung. Trotzdem befinden sich in mehreren europäischen Länder größere Vorkommen (siehe Kapitel 4.1). Daher sind laut der DERA in Zukunft Abbauprojekte (PFS und DFS) geplant. Während in Serbien perspektivisch jährlich etwa 6,9 kt produziert werden könnten, bietet sich in Deutschland die Möglichkeit jährlich bis zu 6,6 kt, in Tschechien 4,9 kt, in Spanien 3,2 kt und in Finnland 2 kt abzubauen. Darüber hinaus strebt Frankreich eine Produktionskapazität von 5,6 kt³⁰ ab dem Jahr 2028 an (vgl. WAC22). Dies ergibt in Summe eine Produktionsrate von 29,2 kt Lithium im Jahr. (vgl. DERA23, S. 48 ff.).

An dieser Stelle wird auf die Vorstellung weiterer Projekte verzichtet, da lediglich ein Trend für die aktuell wichtigsten Standorte der Lithiumproduktion sowie der Hauptmärkte *China*, *USA* und *Europa* im Rahmen der E-Mobilität aufgezeigt werden soll. Auf Basis der geschilderten Information kann erwartet werden, dass die globale Lithiumproduktion in Übereinkunft mit der oben verwendeten Prognose von *Global Data* in den kommenden Jahren ansteigen wird. Weiterhin zeigt sich, dass die Bemühungen zur Produktionssteigerung aufgrund der zunehmenden Bedeutung für E-Fahrzeugbatterien voraussichtlich intensiviert werden.

4.3 Sekundärversorgung durch Recycling

Abgesehen von dem Abbau neuer Rohstoffe kann in Zukunft eine zusätzliche Lithiumversorgung durch Recycling erreicht werden (siehe Kapitel 2.3.4). Beim Erreichen des EoL können die im E-Pkw befindlichen Materialien nach etwa zehn Jahren zurückgewonnen und für die Produktion von neuen Batteriezellen wiederverwendet werden. Dadurch kann die Verfügbarkeit von Lithium weltweit erhöht und ein effizienter Umgang mit der Ressource realisiert werden. Die Akkus von E-Pkw weisen im Verhältnis zu anderen wiederaufladbaren Batterien (u. a. Laptops, Handys, Haushaltsbatterien) eine deutlich höhere Kapazität und somit auch Materialmasse auf. Daher werden diese zukünftig den größten Recyclinganteil

²⁹ **FS:** Vorstufe der DFS. Ähnlich der PFS, umfasst eine FS Resultate der Untersuchung eines potenziellen Bergbauprojekts hinsichtlich technologischer Aspekte, der zu erwartenden finanziellen Aufwendungen sowie der Dauer der Umsetzung. Die Daten sind dabei jedoch detaillierter und somit aussagekräftiger. (vgl. IMAS23) (vgl. PSI23)

³⁰ **Produktionskapazität Frankreich:** Die ursprüngliche Quellenangabe beläuft sich auf 34 kt Lithiumhydroxid. Umgerechnet ergeben sich daraus 5,6 kt Lithium (16,5 %). (vgl. WAC22) (vgl. DERA23, S. 15)

leisten und zu diesem Zweck zunehmend im Fokus stehen. (vgl. DERA23, S. 35)
(vgl. BMBF23, S. 18)

Nachfolgend wird daher das durch Batterierecycling entstehende zusätzliche Potenzial der Sekundärversorgung von Lithium untersucht. Dabei handelt es sich um eine Prognose der theoretisch durch die E-Mobilität entstehenden, wiederverwertbaren Materialmasse. Dies bedeutet jedoch nicht, dass der entsprechende Anteil auch in der Praxis zukünftig realisiert wird. Es sollen lediglich die vorhandenen Möglichkeiten einer zusätzlichen Ausschöpfung neben dem Primärangebot aufgezeigt werden. Für die Ermittlung ist die recyclingfähige Quote unter Berücksichtigung der Verluste relevant – also das Output im Verhältnis zum ursprünglich eingesetzten Input je Batterie. Nach Angaben des Fraunhofer ISI ist derzeit eine Lithiumrückgewinnung von 70 % praktikabel. Hauptverantwortlich für die Verluste sind demnach technische und wirtschaftliche Herausforderungen (siehe Kapitel 2.3.4). Gleichwohl wird davon ausgegangen, dass sich diese Quote in Zukunft deutlich erhöhen lässt und somit bis zu 90 % zurückgewonnen werden könnten. Nach Angaben der DERA wäre es bereits technisch möglich bis zu 90 % des Lithiums der Batterie wiederaufzubereiten (vgl. DERA23, S. 36). Dieser Wert wird ebenfalls von Windisch-Kern, *et. al.* anhand einer praktischen Forschungsarbeit realisiert (vgl. WIK21, S. 150 ff.). Daher wird in der folgenden Analyse ein niedriger Materialverlust beim Lithiumrecycling in Höhe von 10 % angenommen. (vgl. FRH21, S. 18)

Zudem entscheidet die Anzahl der zur Verfügung stehenden Altbatterien über das Recyclingpotenzial, wobei etwa 10 % der abgesetzten E-Pkw nicht mehr zurückgeführt und als Verlust betrachtet werden – zum Beispiel aufgrund von Unfallschäden oder dem Verbleib beim Kunden (vgl. DERA23, S. 54). Zusätzlich kann das Lithium aus dem bei der Zellproduktion entstehenden Ausschuss (siehe Kapitel 3.3.3) wiedergewonnen werden. Aus diesen beiden Quellen (Altbatterien und Ausschuss) kann die verfügbare Recyclingmasse pro Jahr abgeleitet werden. In dem Kontext wird das maximal ausschöpfbare Recyclingpotenzial R für die Sekundärversorgung ermittelt. Dabei werden zusammengefasst folgende Bedingungen angenommen:

- die Verlustquote V_R [%] bei der Lithiumrückgewinnung im Recyclingprozess liegt bei 10 %
- Die Anzahl der dem Recycling zugeführten Batterien leitet sich aus dem 10 Jahre zurückliegenden Absatz A der E-Pkw ab (EoL nach 10 Jahren)
- Der Lithiumanteil je Batterie entspricht der Masse M [kg]
- die Verlustquote V_{E-Pkw} [%] der nicht zurückgeführten E-Pkw liegt bei 10 %
- Die bei der Batteriezellenproduktion entstehende Ausschussquote Q [%] wird dem Recycling zugeführt und leitet sich aus dem jährlichen Lithiumbedarf B_{Jahr} [kg] ab

Die Einflussfaktoren **A**, **M**, **Q** sowie **B_{Jahr}** werden aus der durchgeführten Bedarfsanalyse übernommen (siehe Kapitel 3). Die Prognose des Recyclingpotenzials **R** wird für den Zeitraum 2022 bis 2035 durchgeführt. Die Ergebnisse der jeweiligen Jahre und Szenarien kann der tabellarischen Darstellung im Anhang A.4.4 entnommen werden.

Recyclingpotenzial R = Recycling Altbatterien + Recycling Ausschuss Zellproduktion

$$R_{\text{Jahr}}[\text{kg}] = (1 - V_R) * [A_{E-Pkw}(\text{Jahr} - 10) * M_{E-Pkw}[\text{kg}] * (1 - V_{E-Pkw}) + Q * B_{\text{Jahr}}[\text{kg}]]$$

$$V_R = V_{E-Pkw} = 10 \%$$

Beispielrechnung für **S_{Mid}** im Jahr 2035:

$$R_{\text{Mid}, 2035} = (1 - V_R) * [A_{\text{Mid}}(2025) * M_{\text{Mid}} * (1 - V_{E-Pkw}) + Q_{\text{Mid}} * B_{2035}]$$

$$R_{\text{Mid}, 2035} = (1 - 0,1) * [16.889.499 * 6,84 \text{ kg} * (1 - 0,1) + 0,11 * 343.437.795 \text{ kg}]$$

$$R_{\text{Mid}, 2035} = 127.574.921 \frac{\text{kg}}{\text{Jahr}} = 127,6 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}}$$

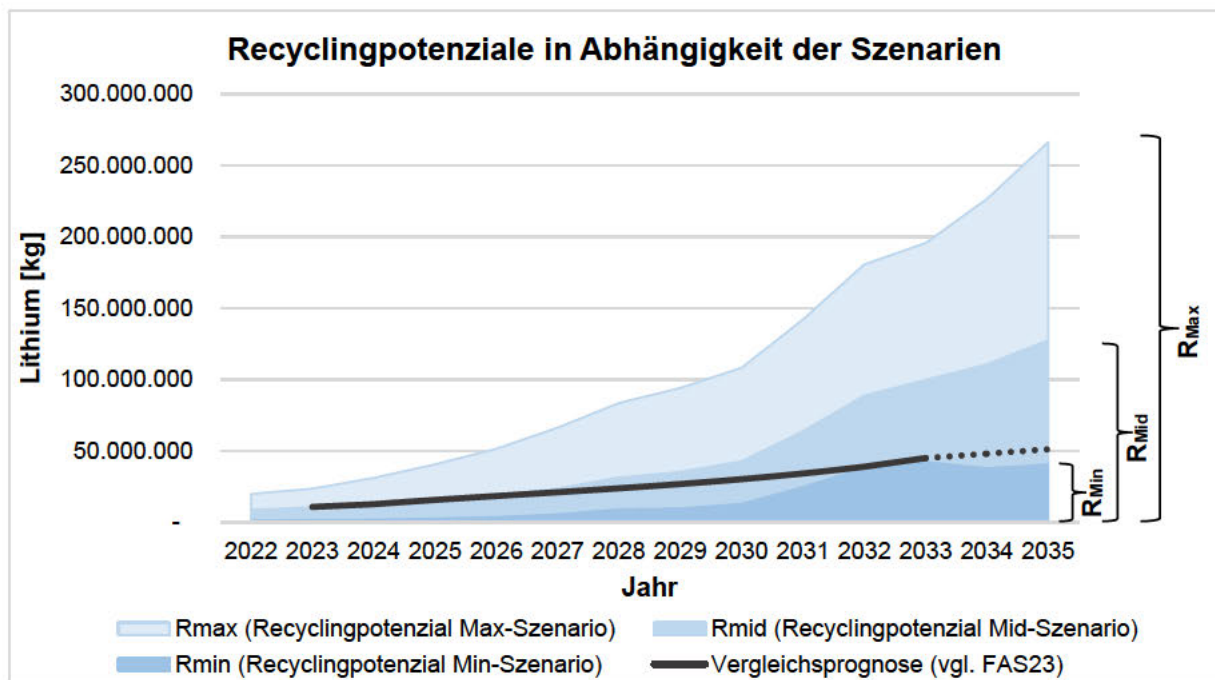


Abb. 4.5: Recyclingpotenziale in Abhängigkeit der Szenarien

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abb. 4.5 als zeitlicher Verlauf bis zum Jahr 2035 dargestellt. Dabei wird zwischen den Szenarien **S_{Min}**, **S_{Mid}**, sowie **S_{Max}** differenziert. Die obere Grenzlinie der markierten Flächen spiegelt jeweils den im Anhang A.4.4 berechneten Verlauf wieder. Aus der Abbildung geht hervor, dass das Potenzial derzeit verhältnismäßig niedrig ausfällt und mit der Zeit langsam zunimmt. Insbesondere ab dem Jahr 2030 kann in allen drei Szenarien mit einem Aufwärtstrend gerechnet werden. Zur Validierung der Ergebnisse wird analog zu der Bedarfsanalyse (siehe Kapitel 3.5) eine Vergleichsprognose von *Fastmarkets* gegenübergestellt (siehe Anhang 4.5). Der Verlauf im Zeitraum 2033 bis 2035 wurde dafür

linear extrapoliert³¹. An dieser Stelle muss berücksichtigt werden, dass die drei Szenarien Potenziale widerspiegeln, die unter optimalen Bedingungen ausgeschöpft werden können, während die Vergleichskurve die zu erwartende tatsächliche Recyclingmasse aufzeigt. Aus der Darstellung geht daher hervor, dass eine Sekundärversorgung im Bereich des Szenarios S_{Mid} wahrscheinlich ist, jedoch im Laufe der Jahre weniger stark ansteigt. Nichtsdestotrotz erwarten die DERA sowie *Benchmark Mineral Intelligence* in diesem Zusammenhang ebenfalls einen deutlichen Anstieg der zur Verfügung stehenden Recyclingmasse im Jahr 2030 sowie einen weiteren Hochlauf in den Folgejahren (vgl. DERA23, S. 35) (vgl. GCC22). Diese Entwicklung ist vor allem auf den Faktor der zurücklaufenden Altbatterien zurückzuführen. Im Jahr 2035 könnten im Szenario S_{Min} wenigstens $R_{Min, 2035} = 42,3 \frac{kt}{Jahr}$ und im Szenario S_{Max} bis zu $R_{Max, 2035} = 266,2 \frac{kt}{Jahr}$ Lithium aus sekundären Quellen zurückgewonnen werden. Der Verlauf im Szenario S_{Mid} erwartet ein potenziell zur Verfügung stehendes Recyclingvolumen $R_{Mid, 2035} = 127,6 \frac{kt}{Jahr}$. Daher kann angenommen werden, dass der lineare Trend der Prognose von *Fastmarktes* sich nicht über das Jahr 2030 fortsetzt. (vgl. FAS23)

Im Lauf der betrachteten Zeitperiode wandelt sich das Verhältnis der Materialherkunft aus Altbatterien und den Produktionsausschüssen. Während im Jahr 2022 im Szenario S_{Mid} über 90 % der Wiedergewinnung auf dem Batteriezellenausschuss basiert, so reduziert sich dieser Anteil auf ca. ein Viertel im Jahr 2035, sodass die restlichen Dreiviertel des recycelten Lithiums aus Altbatterien stammen (siehe Balkendiagramm im Anhang A.4.6). Dies erklärt sich ebenfalls durch den derzeitigen Hochlauf der E-Mobilität mit einer Verzögerung von zehn Jahren. Aktuell erreichen noch wenige E-Pkw den EoL, jedoch entsteht vergleichsweise viel Ausschuss aufgrund des derzeitigen Produktionsvolumens. Die hier gewählte Berechnungsmethode wird durch eine Prognose von *Benchmark Mineral Intelligence* gestützt. Demnach würden im Jahr 2025 rund 78 % der Recyclingmasse aus dem Ausschuss der Batteriezellenproduktion stammen. Im Szenario S_{Mid} werden für dasselbe Jahr 80,4 % ermittelt. Das Ergebnis von *Benchmark Mineral Intelligence* liegt demnach sehr nah an dem hier gewählten Rechenweg und bestätigt damit die Vorgehensweise. (vgl. ECO22)

³¹ **Extrapolation der Vergleichsprognose:** (vgl. KUE23, S. 165 ff.)

$$\begin{aligned} \emptyset \text{Steigung } a &= \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y(2032) - y(2021)}{2032 - 2021} = \frac{611,32 \text{ kt} - 96,23 \text{ kt}}{11 \text{ Jahre}} = 46,83 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} \\ y(2033) &= y(2032) + a = 611,32 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} + 46,83 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} = 658,15 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} \\ y(2034) &= y(2032) + 2 * a = 611,32 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} + 2 * 46,83 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} = 704,97 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} \\ y(2035) &= y(2032) + 3 * a = 611,32 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} + 3 * 46,83 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} = 751,8 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} \end{aligned}$$

4.4 Prognose der Lithiumverfügbarkeit bis 2035

Im Anschluss an die Untersuchung der Ressourcen, Reserven sowie der Primär- und Sekundärproduktion von Lithium, werden die gewonnenen Erkenntnisse in Relation gesetzt. Infolgedessen soll ermittelt werden, wie sich die Lithiumverfügbarkeit bis 2035 entwickelt.

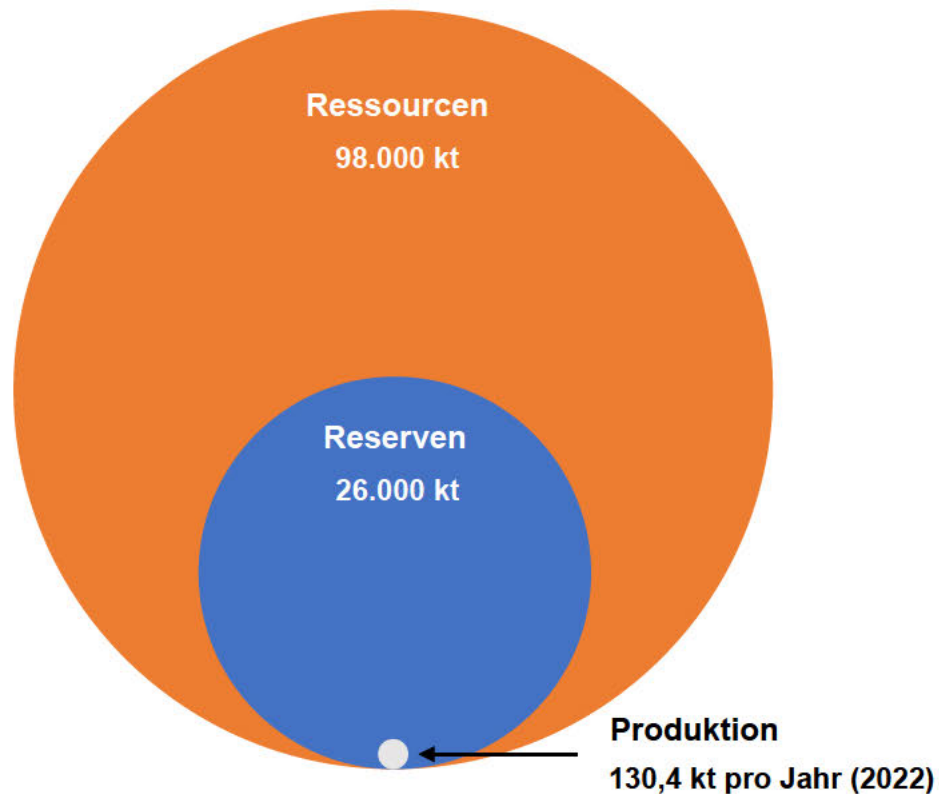


Abb. 4.6: Verhältnis der globalen Ressourcen, Reserven und der jährlichen Produktion von Lithium (Stand 2022) (vgl. USGS23, S. 2) (vgl. GDTD23b)

Das Venn-Diagramm³² in Abb. 4.6 verdeutlicht die aktuellen Verhältnisse zwischen den globalen Ressourcen (98.000 kt), Reserven (26.000 kt) und der Produktion von Lithium (130,4 kt) (Stand 2022). Die *Reserven* bilden demnach eine Teilmenge der *Ressourcen*, da es sich nach der Definition (siehe oben) um wirtschaftlich erschließbare *Ressourcen* handelt. Bei der Produktion wird das Lithium wiederum dort abgebaut, wo *Reserven* bestehen. Dadurch, dass die jeweiligen Rohstoffmengen grafisch in Beziehung gesetzt werden, können deren Dimensionen besser dargestellt und nachvollzogen werden. (vgl. HES20, S. 32 ff.) (vgl. USGS23, S. 2) (vgl. GDT23b)

³² **Venn-Diagramm:** auch Mengendiagramm genannt, verdeutlicht grafisch die Teil- und Schnittmengen von verschiedenen Elementen. *Hier:* Ressourcen, Reserven und Produktion von Lithium. (vgl. HES20, S. 32 ff.)

Die Grafik zeigt, dass der Anteil der Produktion im Jahr 2022 an den theoretisch nutzbaren Reserven lediglich bei 0,5 % und in Bezug auf die Ressourcen bei 0,13 % liegt³³. Die globalen Lithiumreserven würden also bei einer theoretisch gleichbleibenden Abbaugeschwindigkeit fast für die nächsten 200 Jahre ausreichen³⁴. In Bezug auf die derzeitigen Hauptproduzenten wäre der Rohstoff in Australien und China in über 100 Jahren und in Chile in etwa 240 Jahren ausgeschöpft. Unter der Annahme, dass die Ressourcen in Zukunft ebenfalls als Abbaumöglichkeit zur Verfügung stehen könnten, wäre ausreichend Lithium für 750 Jahre vorhanden. Damit ist die Versorgungslage aktuell nicht kritisch einzustufen und es besteht zumindest ausreichend Rohstoffpotenzial, um den Bedarf bis 2035 zu decken. Nichtsdestotrotz ist davon auszugehen, dass die Produktionskapazitäten zur Lithiumgewinnung aufgrund des steigenden Bedarfs (siehe Kapitel 3) in den nächsten Jahren weiter ausgebaut werden, um die Nachfrage bedienen zu können. In diesem Fall wären die Reserven schon zu einem früheren Zeitpunkt erschöpft. Dem Effekt stehen jedoch, als Beobachtung aus der Vergangenheit, die Ressourcen- und Reservenzuwachse durch Neufunde gegenüber (siehe Kapitel 4.1). (vgl. USGS23, S. 2) (vgl. GDT23b) (vgl. THI20, S. 13) (vgl. HRE20, S. 57)

Die Prognose des bis zum Jahr 2035 zur Verfügung stehenden Lithiums stützt sich insbesondere auf die Entwicklung der Produktionskapazitäten. Daher werden folgend die vorangegangenen Untersuchungsergebnisse zusammengeführt und ausgewertet.

³³ **Anteil der Produktion in 2022 an Reserven und Ressourcen:**

$$\text{Produktion pro Reserven [\%]} = \frac{\text{Produktion}}{\text{Reserven}} = \frac{130,4 \text{ kt}}{26.000 \text{ kt}} = \mathbf{0,5 \%}$$

$$\text{Produktion pro Ressourcen [\%]} = \frac{\text{Produktion}}{\text{Ressourcen}} = \frac{130,4 \text{ kt}}{98.000 \text{ kt}} = \mathbf{0,13 \%}$$

³⁴ **Reserven in Jahren:** Hier: Global, restliche Rechnungen siehe Anhang A.4.1.

$$\text{Reserven (Jahren)} = \frac{\text{Reserven}}{\text{jährliche Produktion}}$$

$$\text{Reserven}_{\text{Global}}(\text{Jahren}) = \frac{26.000 \text{ kt}}{130,4 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}}} = 199,4 \text{ Jahre} \approx 200 \text{ Jahre} \rightarrow \text{auf Basis des Jahrs 2022}$$

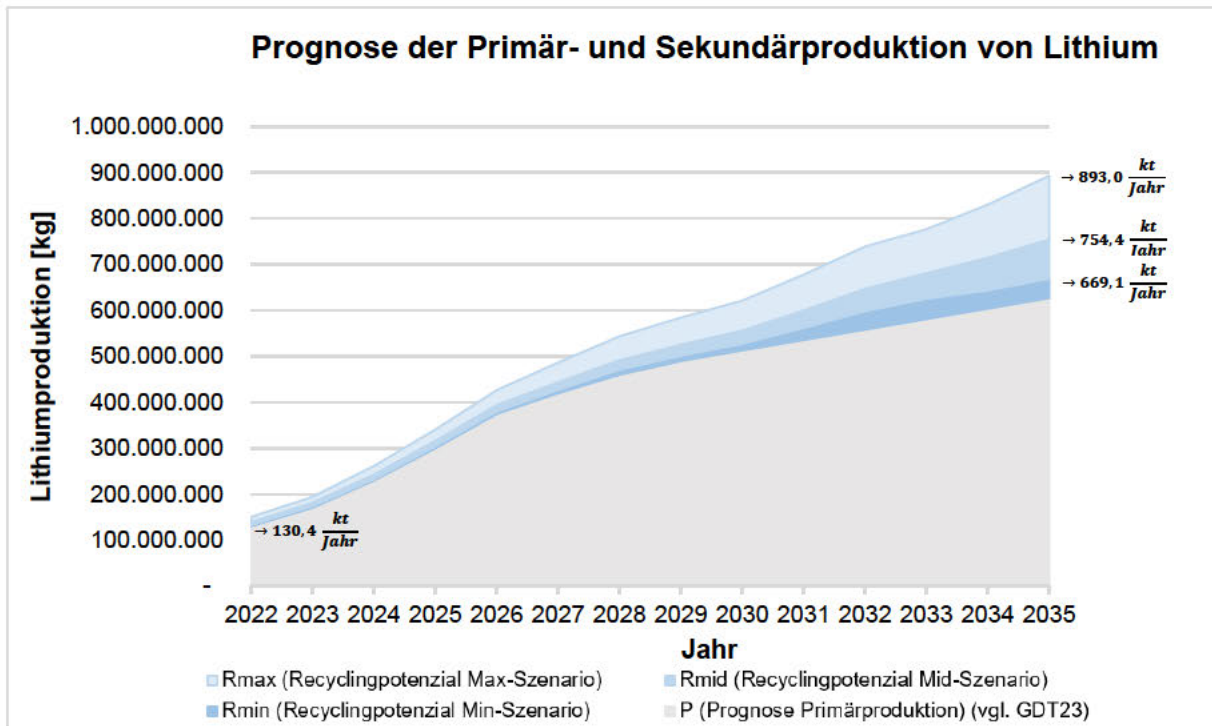


Abb. 4.7: Prognose der Primär- und Sekundärproduktion von Lithium

Die Abb. 4.7 zeigt die zu erwartende Rohstoffverfügbarkeit von Lithium im zeitlichen Verlauf bis zum Jahr 2035 an. Der Verlauf setzt sich aus der Summe der in den vorangegangenen Unterkapiteln ermittelten Primär- und Sekundärproduktion zusammen (siehe Kapitel 4.2 und 4.3). Daraus geht hervor, dass das Recyclingpotenzial im Vergleich zur Primärproduktion aktuell mit 6,4 % im Szenario S_{Mid} einen geringen Anteil ausmacht (siehe Balkendiagramm im Anhang A.4.7). Eine von *McKinsey* veröffentlichte Analyse prognostiziert, dass im Jahr 2030 mehr als 6 % des Lithiumangebots aus dem Recycling stammen könnte (vgl. AZE22). Auf Basis des Szenarios S_{Mid} besteht für dasselbe Jahr ein leicht höheres Recyclingpotenzial von 7,7 %. Dieser Vergleich unterstützt die hier gewählte Methode zur Abschätzung der Sekundärproduktion. Im weiteren Verlauf ist eine kontinuierlich anwachsende Steigerung auf 16,9 % im Jahr 2035 zu sehen. Währenddessen würde dieser Anteil im Szenario S_{Min} lediglich 6,3 % betragen und im Szenario S_{Max} sogar auf 29,8 % steigen. Der Hochlauf ist darauf zurückzuführen, dass die Anzahl der für das Recycling zur Verfügung stehenden Altbatterien zeitlich verzögert zunimmt. Die Abb. 4.7 verdeutlicht, dass Lithium aus der Sekundärversorgung in Zukunft eine wichtige zusätzliche Quelle darstellen wird, die Versorgungssicherheit jedoch insgesamt noch stark von der Primärproduktion abhängt. Im Zeitrahmen bis zum Jahr 2035 kann das Angebot demnach nicht allein durch das Recycling gedeckt werden. Dennoch steuert das wiedergewonnene Lithium zur Deckung des Bedarfs bei und kann eventuelle Engpässe teilweise abmildern.

5 Gegenüberstellung der Analyseergebnisse

In diesem Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse der Bedarfsanalyse sowie der Ressourcenverfügbarkeit gegenübergestellt (siehe Kapitel 3 und 4). Auf Basis des direkten Vergleichs erfolgt eine Auswertung im Hinblick auf die zentrale Forschungsfrage der Arbeit: *Kann der im Rahmen der E-Mobilität entstehende Lithiumbedarf bis 2035 gedeckt werden?*

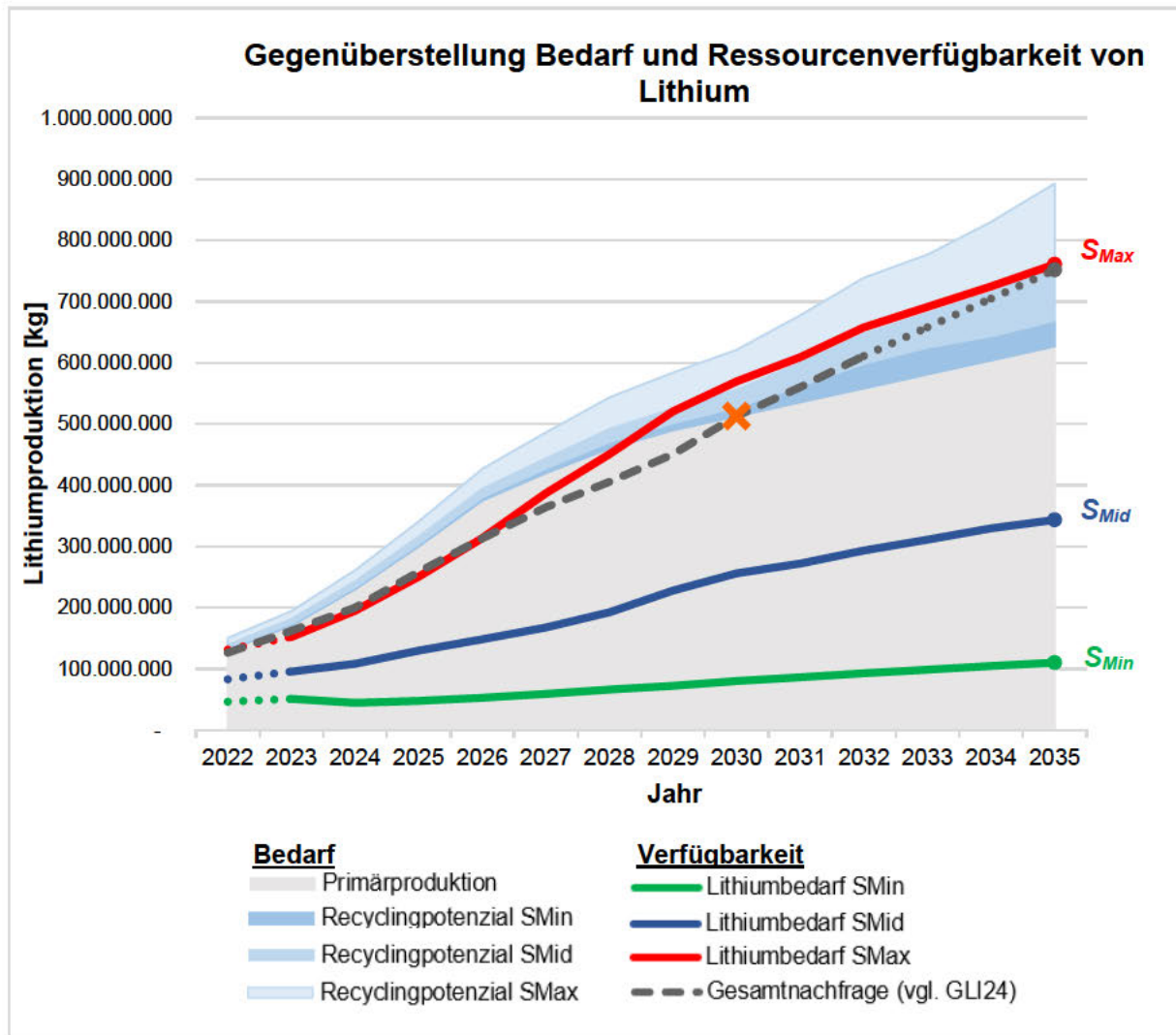


Abb. 5.1: Gegenüberstellung des Lithiumbedarfs und der Ressourcenverfügbarkeit

Die Abb. 5.1 bildet eine Kombination aus der Abb. 3.4 und Abb. 4.7. Dadurch kann der für die jeweiligen Szenarien S_{Mid} , S_{Min} und S_{Max} angenommene Lithiumbedarf für E-Pkw unmittelbar mit der prognostizierten Verfügbarkeit (Primär- und potenzielle Sekundärproduktion) abgeglichen werden. Jedoch wird Lithium mit einem Anteil von ca. 43 % (Stand 2023) nicht ausschließlich für die E-Mobilität, sondern u.a. auch für weitere Zwecke der Batterienutzung, Keramik, Glas oder Schmierstoffe benötigt (siehe Kapitel 2.1) (vgl. NOW23). Daher muss bei der Gegenüberstellung generell die Gesamtnachfrage berücksichtigt werden. Eine von *Global Lithium* veröffentlichte Prognose bis zum Jahr 2032 sowie der linear extrapolierte

Verlauf bis 2035³⁵ werden aus diesem Grund in der Abb. 5.1 ergänzt (siehe Anhang A.5.1). Im Schnitt steigt der Lithiumbedarf demnach jährlich um etwa 47 kt auf 752 kt im Jahr 2035. (vgl. GLI24)

Aus der Abb. 5.1 geht zudem hervor, dass die Sekundärproduktion aus Recycling von Lithium derzeit nicht ausreicht, um die Versorgung zusätzlich zur Primärproduktion maßgeblich zu erhöhen. Jedoch kann in den folgenden Jahren ein positiver Trend beim potenziellen Recyclingvolumen angenommen werden. Die Abb. 5.1 zeigt, dass der Gesamtbedarf an Lithium ab dem Jahr 2030 (X-Markierung) nur dann gedeckt werden kann, wenn diese Recyclingpotenziale ausgeschöpft werden. Da die Primärproduktion voraussichtlich nicht mehr ausreichend Lithium bereitstellt, nimmt die Bedeutung der Sekundärversorgung in den darauf folgenden Jahren bis 2035 immer stärker zu. Daher wird die Realisierung von potenziellen Lithiumquellen aus dem Recycling entscheidend zur Absicherung der Bedarfsdeckung beitragen und möglicherweise auftretenden Engpässen entgegenwirken. Insbesondere ab dem Jahr 2030 könnte die Versorgung ohne recyceltes Lithium kritisch werden. In dem Jahr 2035 würde der Gesamtbedarf annähernd der Verfügbarkeit inklusive der Recyclingmasse des Szenario S_{Mid} entsprechen und somit die bedenkliche Grenze zwischen Angebot und Nachfrage erreichen. Daher ist davon auszugehen, dass sich die Lage der Lithiumversorgung langfristig tendenziell eher verschlechtert, als verbessert – unter der Prämisse, dass kein neuen, leicht erschließbaren Ressourcen gefunden und abgebaut werden. (vgl. GLI24) (vgl. DERA23, S. 39)

Die Nachfrage aus dem E-Fahrzeugsegment trägt stark zur Bedarfssteigerung von Lithium bei. Nichtsdestotrotz geht aus der Abb. 5.1 hervor, dass die Lithiumverfügbarkeit ebenfalls proportional zum Bedarf ansteigt und keine gegenläufige Tendenz zu erkennen ist. Daher kann geschlussfolgert werden, dass bis zum Jahr 2035 aus heutiger Sicht keine starke Differenz zwischen Angebot und Nachfrage erwartet und der Lithiumbedarf ausreichend gedeckt werden kann. Jedoch besteht dazwischen kein risikofreier Spielraum. In den vergangenen Jahren lagen der Lithiumbedarf und die -produktion immer sehr nah beieinander, sodass temporäre Engpässe entstanden sind. Durch den in kurzer Zeit stark steigenden Bedarf können sich

³⁵ **Extrapolation der Gesamtnachfrage:** (vgl. KUE23, S. 165 ff.)

$$\emptyset \text{Steigung } a = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y(2032) - y(2021)}{2032 - 2021} = \frac{611,32 \text{ kt} - 96,23 \text{ kt}}{11 \text{ Jahre}} = 46,83 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}}$$

$$y(2033) = y(2032) + a = 611,32 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} + 46,83 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} = 658,15 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}}$$

$$y(2034) = y(2032) + 2 * a = 611,32 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} + 2 * 46,83 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} = 704,97 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}}$$

$$y(2035) = y(2032) + 3 * a = 611,32 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} + 3 * 46,83 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}} = 751,80 \frac{\text{kt}}{\text{Jahr}}$$

diese Engpässe wiederholen. Bei einer Entwicklung gemäß des wahrscheinlichsten Szenarios S_{Mid} wird im Jahr 2035 fast die Hälfte (44,8 %) des Primärangebots von Lithium für die Batterieproduktion von E-Pkw aufgewendet. Dieser Anteil verdeutlicht nochmals den hohen Einfluss der E-Mobilität auf den gesamten Markt. Bei einem vergleichsweise geringen Bedarf im Szenario S_{Min} beträgt dieser Anteil lediglich 17,6 %. Daher kann die Versorgungslage in diesem Fall als unkritisch eingestuft werden. Problematisch wäre die Bedarfsdeckung hingegen bei einer Nachfrage im Szenario S_{Max} . Der alleinige Bedarf für E-Pkw würde näherungsweise der von *Global Lithium* prognostizierten Gesamtnachfrage im Jahr 2035 entsprechen und das vorhandene Lithium aus Primärquellen voll ausschöpfen. In diesem Fall würde der Gesamtverbrauch also insgesamt noch deutlich über dem Kurvenverlauf von *Global Lithium* liegen, sodass ein gravierendes Versorgungsdefizit entstehen würde. Insgesamt trifft jedoch der Verlauf S_{Mid} voraussichtlich am wahrscheinlichsten auf die zukünftige Bedarfsentwicklung zu. Mit Verweis auf die in Abb. 3.4 dargestellte Vergleichsprognose (siehe Kapitel 3.5) könnte die Lithiumnachfrage für E-Pkw gegebenenfalls auch mittig zwischen S_{Mid} und S_{Max} verlaufen. In diesem Fall könnte der E-Mobilitätsanteil am Lithiumbedarf deutlich höher ausfallen. In dieser Auswertung wird sich jedoch in erster Linie auf die Ergebnisse der durchgeführten Analyse bezogen. Da der Lösungsweg der szenarienabhängigen Bedarfe detailliert nachvollzogen werden kann, sind deren Verläufe im Rahmen dieser Arbeit aussagekräftiger. (vgl. DERA23, S. 39)

6 Handlungsempfehlungen für die Beschaffung von Lithium

Auf Basis der Ergebnisse der Bedarfsanalyse im Verhältnis zur Ressourcenverfügbarkeit können allgemeine Handlungsempfehlungen für die Beschaffung von Lithium abgeleitet werden. Aus der Prognose geht hervor, dass der Rohstoff im Laufe der nächsten Jahre zwar den Bedarf decken kann, aber tendenziell eher knapp zur Verfügung steht. Neben dem hauptsächlichen Verwendungszweck für die E-Mobilität werden auch weitere Branchen die Ressource beanspruchen. Daher sollten Batterie- und Automobilhersteller ihre aktuellen Bezugsquellen und Lieferantenbeziehungen halten, absichern und weiter ausbauen. (vgl. THI20, S. 13)

Die USGS verdeutlicht in diesem Zusammenhang:

„Die Sicherheit der Lithiumversorgung ist zu einer obersten Priorität für Technologieunternehmen in Asien, Europa und Nordamerika geworden³⁶.“

[aus dem Englischen übersetzt] (USGS23, S. 2)

Aus diesem Grund müssen frühzeitig strategische Maßnahmen getroffen werden, um die Versorgung mit den benötigten zusätzlichen Lithiumkapazitäten zu gewährleisten. China beansprucht bereits mehr als die Hälfte des zur Verfügung stehenden Lithiums (vgl. THP23, S. 18). Daher werden vornehmlich europäische und US-amerikanische Batterie- und Automobilhersteller mit Herausforderungen bei der Belieferungssicherung konfrontiert sein. In diesem Kapitel werden daher globale und lokale Lieferantenstrategien sowie operative Handlungsansätze empfohlen. In diesem Zusammenhang wird Bezug auf die Beschaffungsziele (siehe Kapitel 2.3.2) genommen. Abschließend werden die gesamten Analyseergebnisse der Arbeit vor diesem Hintergrund kritisch diskutiert.

6.1 Sourcingstrategien

Die strategische Ausrichtung der Beschaffung wird als *Sourcing* bezeichnet und definiert die Rahmenbedingungen für die Identifikation und Auswahl von Lieferanten zur Versorgungssicherung. Daher werden in diesem Unterkapitel gängige Konzepte vorgestellt und auf die Lithiumnachfrage bezogen. (vgl. ALT24) (vgl. LAS22, S. 3 ff.)

Global Sourcing

Bei der Beschaffungsstrategie eines *Global Sourcing*s werden potenzielle Lieferanten international ausgewählt, wodurch alle zur Verfügung stehenden Angebote berücksichtigt werden können. Dieses Vorgehen ist erforderlich, da sich die Lithiumabbaugebiete weltweit verteilen und regional eventuell keine Versorgung möglich ist. Daher schließt ein

³⁶ **Originaltext (engl.):** „Lithium supply security has become a top priority for technology companies in Asia, Europe, and North America.“ (USGS23, S. 2)

Global Sourcing der Lithiumbeschaffung alle im Kapitel 4 thematisierte sowie potenzielle zukünftige Abbaustandorte mit ein. (vgl. WAN21, S. 174 ff.)

Dabei ist es sinnvoll, sich auf die Regionen zu konzentrieren, die bereits heute über große wirtschaftlich erschließbare Reserven sowie eine etablierte Lithiumproduktionen verfügen. Hier sind insbesondere Australien, Chile und China zu nennen, wo bereits ein intensiver Abbau betrieben wird, der in den nächsten Jahren sogar erweitert werden soll (siehe Kapitel 4.2). Die Länder stellen somit aussichtsreiche Quellen für die nachfragenden Unternehmen dar. Zusätzlich sollten aktuelle und zukünftige Vorhaben in Regionen beobachtet werden, die ebenfalls über hohe Reserven verfügen. Hier ist daher zusätzlich zu den oben genannten Ländern Argentinien interessant, wo mehrere neue Abbaustätten entstehen sollen. Ebenso könnten Potenziale aus den Funden im McDermitt Caldera in den USA erschlossen und angeboten werden. Aber auch die Kontinente Europa und Afrika verfügen über Lithiumvorkommen und Produktionspläne. Obwohl diese in Bezug auf den Lithiumabbau aktuell nicht im Fokus stehen, könnte die dort vorhandenen Ressourcen in Zukunft weitere Versorgungspotenziale darstellen. Diese sollten daher ebenfalls im Rahmen eines *Global Sourcing* in Betracht gezogen werden.

Local Sourcing

Bei einem *Local Sourcing* werden die Lieferanten hingegen regional beschränkt aufgrund ihrer geografisch günstigen Lage in Betracht gezogen. Durch die Nähe zum nachfragendem Unternehmen können Lieferzeiten und -kosten reduziert werden. Eventuelle Störungen beim Lieferprozess sind daher eher unwahrscheinlich. Dadurch entsteht eine größere Unabhängigkeit von Importen aus den führenden Lithiumabbauländern auf dem Weltmarkt. Der Aufbau einer Lithiumversorgung im Rahmen eines *Local Sourcing* setzt voraus, dass in dem näheren Umfeld der Automobil- und Fahrzeughersteller ein potenzieller Lieferant existiert, der auch die benötigten Qualitäten und Kapazitäten aufweist. Diese Strategie kann daher nicht von allen nachfragenden Unternehmen der Automobilbranche umgesetzt werden und muss individuell geprüft werden. (vgl. WAN21, S. 171 f.)

Dual und Multiple Sourcing

Die Versorgungssicherheit kann darüber hinaus durch ein *Dual* oder *Multiple Sourcing* gewährleistet werden – also eine Zwei- bzw. Mehrlieferantenstrategie gefahren werden. Hier steht also nicht die geografische Auswahl, sondern die Anzahl der Lieferanten im Fokus. Aufgrund des starken Anstiegs der Nachfrage und zeitlichen Verzögerungen beim Produktionshochlauf können vorübergehende Engpässe bei der Lithiumversorgung entstehen. Wenn sich die gesamte Lieferantenstruktur nur auf einen einzelnen Anbieter (*Single Sourcing*) beschränkt, kann es zu Versorgungsunterbrechungen kommen und die Aufrechterhaltung der

Batteriezellproduktion gefährden. Dieses Risiko könnte durch die Stütze auf mehrere Bezugsquellen reduziert werden. Bei der Verfolgung der Strategie des Multiple Sourcing muss jedoch bedacht werden, dass im Vergleich zu der Nominierung von einem einzigen Lieferanten im Rahmen eines Single Sourcing geringere Skaleneffekte³⁷ erzielt werden können, was wiederum höhere Beschaffungskosten verursacht. Darüber hinaus entsteht ein höherer Aufwand bei den unterschiedlichen Abläufen der Logistikprozesse und des Lieferantenmanagements. (vgl. WAN21, S. 171 f.) (vgl. IRE23) (vgl. OEI23, S. 56)

Sourcingentscheidung

In der Praxis können mehrere Sourcingmodelle kombiniert werden. Die Möglichkeiten der Anwendung einer bestimmten Strategie ist jedoch in Abhängigkeit der Unternehmenslage und -größe beschränkt. Zum Beispiel ist der Logistikaufwand bei den geringen Liefervolumen zu kleinen und mittlere Unternehmen (KMU) beim Global Sourcing sehr hoch. Zudem steigen KMU tendenziell weniger tief in die Wertschöpfungskette ein. Daher ist anzunehmen, dass die internationale Beschaffungsstrategie eines *Global Sourcing* beim Lithium hauptsächlich von *Original Equipment Manufacturern* (OEM) realisiert werden. (vgl. WAN21, S. 675) (vgl. KKL08)

6.2 Kriterien für die Lieferantwahl

Auf Grundlage der strategischen Sourcing-Entscheidungen werden Handlungsansätze formuliert. Diese dienen den Automobil- und Batterieherstellern als Orientierung, um das oberste Ziel der bedarfsgerechten Lithiumversorgung zu gewährleisten. Bei der operativen Auswahl der Lieferanten müssen dabei verschiedene Kriterien beachtet werden, die folgend aufgelistet und beschrieben werden.

1. Hohe Kapazitäten langfristig sichern

Die Bedarfsanalyse (siehe Kapitel 3) zeigt, dass der gesamte Lithiumverbrauch aufgrund des jährlich wachsenden Absatzvolumens deutlich ansteigt. Daher könnten die derzeitigen bezogenen Liefermengen nicht ausreichen, um den Bedarf der Automobilindustrie bis 2035 zu decken. Um die aktuelle und zukünftige Lithiumversorgung zu sichern, sollten also aussichtsreiche und kapazitätsstarke Beschaffungsquellen identifiziert werden. Dafür eignen sich insbesondere große Abbauunternehmen, die in den Hauptproduktionsländern Australien, Chile und China operieren. Durch den Aufbau einer Lieferantenbeziehung können vertraglich große Mengen an Lithium gesichert werden. Zusätzlich können als weiterer positiver Effekt durch das große Abnahmevermögen Preisnachlässe verhandelt werden. Damit die Bedarfsdeckung mit Lithium langfristig gewährleistet wird, ist zu empfehlen, dass die Verträge

³⁷ **Skaleneffekte:** Kosteneinsparung bei der Bündelung von hohen Einkaufsvolumen (vgl. VOI24).

auf einen mehrere Jahre umfassenden Zeitraum geschlossen werden – zum Beispiel für die nächsten fünf bis zehn Jahre. (vgl. LAS22, S. 4 ff.) (vgl. BAL23)

2. Battery-Grade Qualität sicherstellen

Drüber hinaus müssen die Qualitätsansprüche an die Reinheit des Lithiums erfüllt werden. Die Eignung als Batteriebestandteil wird anhand der Kategorie Battery-Grade gemessen. Dafür wird bei der Rohstoffgüte eine Reinheit von über 95,5 % vorausgesetzt (siehe Kapitel 2.3.1). Da es bei der geographischen Herkunft des Lithiums keine qualitativen Unterschiede gibt, kann keine Empfehlung getroffen werden, ob australisches, chilenisches, chinesisches oder Lithium aus sonstigen Ländern den Anforderungen am besten gerecht werden. Die Erfüllung der Anforderungen lässt sich hingegen am ehesten gewährleisten indem ausschließlich klassifizierte Lieferanten gewählt und Qualitätsgarantien abgesichert werden. Die Eigenschaft des Battery-Grade stellt eine Mindestanforderung dar, die in jedem Fall eingehalten und kontrolliert werden muss. (vgl. NUM21) (vgl. ASS23)

3. Preiskonditionen berücksichtigen

Des Weiteren ist die Kostenreduktion eine zentrale Zielsetzung von Unternehmen, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten. Daher führen beschaffende Unternehmen Verhandlungen, um sich günstige Angebotspreise zu sichern. In Bezug auf Lithium wird nach Angaben des *Fraunhofer ISI* ein lieferzeitpunktabhängiger Referenzmarktpreis gezahlt. Das heißt, dass kein fester Preis verhandelt wird, sondern die durch Angebot und Nachfrage beeinflusste Marktdynamik den Preis vorgibt. Diese Preisbildung wird häufig bei der Beschaffung von Rohstoffen in Form einer sogenannten Preisgleitklausel vertraglich festgelegt. Die aktuelle und zukünftige Marktentwicklung sollte daher fortlaufend beobachtet werden. (vgl. BAL23) (vgl. WAN21, S. 136 ff.)

Durch eine Momentaufnahme der aktuellen Lithiumkosten pro E-Pkw kann eine grobe Referenz der zu erwartenden finanziellen Aufwendungen abgebildet werden. Ausgehend von der Lithiumbedarfsermittlung im Kapitel 3 können die aktuell erforderlichen Materialeinzelkosten (MEK) des Lithiums pro E-Fahrzeug geschätzt werden. Dafür wird der aktuelle Marktpreis von ca. 12.000 € je t LCE (Stand 2024) mithilfe des Faktors 5,3 in die Einheit kg Lithium umgerechnet (siehe Kapitel 2.3.2). Anschließend kann die Lithiummasse pro E-Pkw $M_{Netto}[kg]$, nach den jeweiligen Szenarien differenziert, mit dem Marktpreis multipliziert werden. (vgl. THI20, S. 13) (vgl. OEI23, S. 56) (vgl. ARN22, S. 6 ff.)

$$12.000 \frac{\text{€}}{\text{t LCE}} * 5,3 \frac{\text{t LCE}}{1.000 \text{ kg Lithium}} = 63,6 \frac{\text{€}}{\text{kg Lithium}} \rightarrow \text{Marktpreis}_{2024}$$

$$Li-MEK_{Mid}[kg] = M_{Mid,Netto}[kg] * Marktpreis_{2024} = 6,84 \text{ kg} * 63,6 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = \mathbf{435,02 \text{ €}}$$

$$Li-MEK_{Min}[kg] = M_{Min,Netto}[kg] * Marktpreis_{2024} = 4,04 \text{ kg} * 63,6 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = \mathbf{256,94 \text{ €}}$$

$$Li-MEK_{Max}[kg] = M_{Max,Netto}[kg] * Marktpreis_{2024} = 10,23 \text{ kg} * 63,6 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = \mathbf{650,63 \text{ €}}$$

Die Ergebnisse zeigen, dass bei dem Lithiumanteil pro Batterie aktuell mit zwischen 250 € und 650 € zu rechnen ist und damit hohe MEK verursacht werden. Durch die beispielhafte Berechnung wird verdeutlicht, dass die Wahl eines günstigen Lieferanten eine hohe Hebelwirkung auf die Gesamtkosten hat. Denn je höher der Materialeinsatz in den jeweiligen Szenarien ist, desto wichtiger wird das Entscheidungskriterium des Preises bei der Lieferantenwahl. Dabei ist zu beachten, dass der Lithiumpreis derzeit wieder auf einem niedrigen Niveau liegt. Im Jahr 2022 hat der Preis noch mehr als das Fünffache betragen. Die Marktpreise stellen also immer eine Momentaufnahme dar und werden bei strategischen Rohstoffen, wie Lithium, stark durch die Nachfrage und das Angebot beeinflusst. In der Folge können vorübergehende Versorgungsengpässe die Lithiummarktpreise, so wie bereits in der Vergangenheit, stark ansteigen lassen. (vgl. ETO24) (vgl. STR24)

In Bezug auf die Herstellungs- und Lohnkosten des Lithiums ist darüber hinaus zu berücksichtigen, dass es Unterschiede in Abhängigkeit der Abbaumethode gibt. Diese Faktoren können sich auf die Wirtschaftlichkeit des Lieferantenbetriebs auswirken und sollten daher Berücksichtigung finden. Die Gewinnung aus Salaren ist weniger aufwendig als der Erzbergbau (siehe Kapitel 2.3.2). Daher kann Lithium in Chile zu günstigeren Konditionen produziert werden als in Australien oder China. Zudem unterscheiden sich die durchschnittlichen Lohnkosten im verarbeitenden Gewerbe der Länder. Während in China ca. 7,00 € und Chile etwa 7,40 € pro Stunde gezahlt werden, liegen die Stundenlöhne in Australien zwischen 22,00 € und 28,00 € deutlich darüber. (vgl. ZAC17) (vgl. SCR19, S. 68) (vgl. DES19)

Alternativ zur Rohstoffbeschaffung über externe Lieferanten können sich die Batterie- und Fahrzeughersteller perspektivisch Minenbeteiligungen sichern. Dadurch kann die Lieferung stärker abgesichert und besser kontrolliert sowie die Marktpreisschwankungen umgangen werden. Diese Option erfordert jedoch hohe Erstinvestitionen und kann daher nur von OEMs in Betracht gezogen werden. (vgl. BAL23)

4. Logistikaufwand beachten

Zusätzlich muss der Logistikaufwand für den Transport des Rohstoffs von der Abbaustätte bis zur Batteriezellfertigung beachtet werden. In diesem Zusammenhang können die Wegstrecken, das Zeitfenster sowie die Wahl der Verkehrsmittel die Höhe der anfallenden

Logistikkosten beeinflussen. Daher ist die Priorisierung der Lieferantenstandorte jeweils abhängig von der Lage und Entfernung zu den Batterieproduktionsstätten. Aus diesem Grund können die Hautmarktakteure in China, Europa und den USA unterschiedliche Bewertungen treffen. Zum Beispiel ist die Beschaffung aus Chile und China für die USA und Europa mit kürzeren Strecken verbunden, als aus Australien. Umgekehrt wäre für China – neben der inländischen Versorgung – die Route aus Australien am effizientesten. Die Höhe der zu berücksichtigenden Logistikkosten stellt daher eine individuelle, standortabhängige Fragestellung dar. Insgesamt sollte die Entscheidung jedoch vor allem kurze Wege in den Vordergrund stellen. Denn die Transportkosten können auch durch zunehmende CO₂-Preise ansteigen. Zudem besteht bei komplexen logistischen Lieferprozessen ein erhöhtes Ausfallrisiko. (vgl. THP23, S. 19) (vgl. THI20, S. 12 ff.) (vgl. VDMA23, S. 15) (vgl. WAN21, S. 5 ff.)

5. Geopolitische Risiken minimieren

In diesem Kontext müssen zudem die mit international verzahnten Lieferketten einhergehenden Herausforderungen in Bezug auf geopolitische Risiken geprüft werden (siehe Kapitel 2.3.2). Bei der Lithiumbeschaffung können Lieferverzögerungen oder -ausfälle auftreten. In der Folge von Engpässen entstehen Unterbrechungen im Fertigungsprozess der Batterie, die sich auf die gesamte E-Pkw-Produktion auswirken und vermieden werden sollten. Die Bewertung der geopolitischen Risiken kann zum Beispiel vereinfacht durch den Länderrisikoindex der *Organisation for Economic Cooperation and Development* (OECD) erfolgen. Für die Einschätzung werden u. a. die Gefahr von Unsicherheiten bei Devisengeschäften³⁸ sowie politische Unruhen, Kriege und Naturkatastrophen herangezogen. Dabei werden die Kategorien von 0 (kein Risiko) bis 7 (sehr hohes Risiko) definiert. Australien und Chile werden als einkommensstarke OECD-Staaten nicht klassifiziert und gelten als sichere Regionen. China wird seit Beginn der Datenerhebung konstant mit der Note 2 bewertet (Stand 2024). Die Gefahr geopolitischer Risiken ist demnach gering aber trotzdem möglich und sollte vor der Lieferantwahl diskutiert werden. Insgesamt muss jedoch beachtet werden, dass der Länderrisikoindex der OECD keine vollumfängliche Sicherheit garantiert, da unvorhergesehene Ereignisse die Kategorisierung kurzfristig revidieren könnten. Es handelt sich immer nur um eine Momentaufnahme, die eine allgemeine Einstufungsgrundlage vorgibt. Die Bewertung der geopolitischen Sicherheit sollte zusätzlich durch weitere Indizes gestützt werden, um eine differenzierte Einschätzung zu potenziellen Gefahren zu treffen. (vgl. HRE20, S. 57) (vgl. WAN21, S. 174 ff.) (vgl. OECD24)

³⁸ **Devisengeschäft:** Transaktionen zwischen verschiedenen Währungen (vgl. GES24).

6. ESG-Konformität prüfen

Als letztes Kriterium sollte die Einhaltung der ESG-Ziele des Lieferanten geprüft und in den Entscheidungsprozess miteinbezogen werden. Darunter fallen vor allem Aspekte des nachhaltigen Abbaus sowie die Arbeitsbedingungen in den Minen. In Zukunft wird sich die Bedeutung der Taxonomie für klimaschädliche Aktivitäten verstärken. Diese findet bereits in der EU Anwendung und meint die monetäre „Klassifizierung von nachhaltigen Wirtschaftsaktivitäten“ (BMUV24). Daher ist die Beachtung der Umweltauswirkungen nicht nur zum Zweck einer positiven Außenwirkung von Unternehmen, sondern auch aus ökonomischer Sicht erforderlich. (vgl. BMUV24) (vgl. MAZ22)

Ein großer Beitrag kann in diesem Zusammenhang durch den Lithiumbezug aus Recyclingquellen geleistet werden. Aus der Gegenüberstellung im Kapitel 5 geht hervor, dass eine zusätzliche Versorgung aus recyceltem Lithium ab 2030 sogar notwendig sein wird, um den Bedarf zu decken. Insbesondere Länder, die über geringe oder keine Eigenversorgung verfügen, aber stark an der Automobilproduktion beteiligt sind, bietet sich daher die Chance eine Kreislaufwirtschaft zu etablieren. Dies betrifft derzeit vor allem Europa. Während dort der Absatz von E-Fahrzeugen hoch ist, wird – abgesehen von jährlich 0,6 kt in Portugal (Stand 2022) – fast gar keine Lithiumproduktion betrieben (vgl. USGS23, S. 2). Die in den nächsten Jahren zurückfließenden Altbatterien könnten durch ein umfassendes Recyclingkonzept einen Teil dieser Lücke schließen. Daher wäre es für Batterie- und Fahrzeughersteller empfehlenswert in Recyclingunternehmen zu investieren und innovative Verfahrenstechnologien zu unterstützen. Darüber hinaus können unternehmenseigene Recyclinganlagen aufgebaut werden, wodurch der Materialfluss direkt kontrollierbar und steuerbar wird. Dafür müsste zunächst der Rücklauf von Altbatterien sichergestellt werden. In diesem Zusammenhang bietet beispielsweise *Renault* bereits einen neuen Ansatz, bei dem ein Mietkonzept für die Batterie angeboten wird. Dabei kann der Kaufpreis eines E-Pkw optional um den hohen Preisanteil der Batterie reduziert werden. Stattdessen werden monatliche Mietraten fällig, die nach der gefahrenen Kilometerleistung gestaffelt sind. Während die Anschaffung aus Sicht des Kunden dadurch attraktiver und die Leistungsfähigkeit der Batterie garantiert wird, sichert sich der Hersteller das Eigentum und kann diese dem Recycling zuführen. (vgl. AGO17, S. 53) (vgl. RFS23) (vgl. REC20) (vgl. HRE20, S. 57) (vgl. FTZ23, S. 56)

6.3 Allgemeine Handlungsempfehlung

Aus den in diesem Kapitel formulierten Sourcingstrategien und zu berücksichtigenden Kriterien für die Lieferantenauswahl wird eine allgemeine Handlungsempfehlung zusammengefasst. Diese richtet sich an die Beschaffungsbereiche von Automobil- und Batterieherstellern.

Anforderungskriterien	Hauptlieferant A Global	Lieferant B Lokal	Lieferant C Recycling, lokal
Kapazität	●	●	●
Qualität	●	●	●
Preis	●	●	●
Logistik	●	●	●
Geopolitische Sicherheit	●	●	●
ESG	●	●	●

● Erfüllung ● Erfüllungsrisiko

Tab. 6.1: Allgemeine Empfehlung für ein Lithium-Lieferantenkonzept

Die Tab. 6.1 bildet den hier getroffenen Vorschlag zusammenfassend ab. Dafür werden drei verschiedene fiktive Lieferanten ausgewählt und anhand der im Kapitel 6.2 erläuterten Anforderungskriterien bewertet. Dabei wird jeweils zwischen einer sicheren und risikobehafteten Erfüllung differenziert. Die Tabelle soll nicht als Entscheidungsgrundlage für oder gegen die dargestellten Lieferanten fungieren, sondern ein Gesamtkonzept für die Lithiumversorgung evaluieren. Bis auf den kompromisslosen Punkt der Lithiumqualität kann die Erfüllung der restlichen Faktoren nicht bei allen drei Lieferanten parallel garantiert werden. Die Idee dieser Mehrlieferantenstrategie ist daher, dass jede Anforderung durch mindestens einen Lieferanten gedeckt werden kann, sodass das Gesamtrisiko in Summe minimiert wird.

Aufgrund der derzeit hohen Abbauvolumen sollte der **Hauptlieferant A** von Lithium global aus den beschriebenen produktionsstarken Ländern in Australien, Chile und China gewählt werden. Damit kann der Hauptbedarf der Lithiumkapazitäten für die Batterieproduktion zu einem niedrigen Preis gedeckt werden. Welches der drei Länder am ehesten in Frage kommt ist abhängig von dem Standort des beschaffenden Unternehmens und der individuellen Gewichtung der übrigen Anforderungskriterien. Zusätzlich zu der Wahl eines Hauptlieferanten werden zur Diversifikation der Versorgungstützen zwei weitere Lieferanten ausgewählt. Dabei wird empfohlen, dass bei der Wahl des **Lieferanten B** auf lokale Angebote gesetzt wird, um temporäre Versorgungsschwierigkeiten aufgrund von logistischen oder geopolitischen Herausforderungen zu überbrücken. Zusätzlich sollten die Bedeutung der Verwendung von nachhaltigem Lithium aus Recycling berücksichtigt werden und ein **Lieferant C** für die Einhaltung von ESG-Ziele ausgewählt werden. Dabei bietet es sich an, wenn möglich, ebenfalls auf lokale Unternehmen zu setzen, damit das Sekundärlithium ebenfalls bei Engpasslagen zur Verfügung steht. Schlussendlich muss jedes Unternehmen eine eigene schwerpunktmäßige Entscheidung bei der Lieferantenwahl auf Basis der individuellen Anforderungen treffen. Beispielsweise werden bei kleinen E-Pkw andere Priorisierungen als bei Oberklassefahrzeugen getroffen.

6.4 Kritische Diskussion

Abschließend werden vor dem Hintergrund dieser Arbeit mögliche Beschränkungen der Forschung kritisch reflektiert sowie ein Ausblick für potenzielle weiterführende Untersuchungsgebiete gegeben. Die Analyseergebnisse weisen darauf hin, dass die E-Mobilität im zeitlichen Verlauf bis 2035 einen steigenden Lithiumbedarf beansprucht. Gleichzeitig wird dieser hohe Anteil am Verbrauch durch einen parallelen Hochlauf der Produktionskapazitäten der derzeitigen und zukünftigen Abbauminen sowie zunehmenden Recyclingressourcen gedeckt. Nichtsdestotrotz kann die Bedarfsentwicklung stark von dem wahrscheinlichsten Szenario abweichen und daher kurzfristige Engpässe entstehen, sodass eine eindeutige Vorhersage nicht möglich ist. Automobil- und Batteriehersteller sollten daher strategische Überlegungen treffen, um die eigene Versorgung mit Lithium langfristig sicherzustellen.

Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit setzen voraus, dass die zugrunde gelegten Daten valide sind. Zum Beispiel sind ältere Prognosen deutlich pessimistischer, als kürzlich Veröffentlichte. Der aktuelle Informationsstand muss daher ständig an neue Fakten angepasst werden. Aus diesem Grund müssen die Ergebnisse in regelmäßigen Abständen kontrolliert und aktualisiert werden. Diese Arbeit kann hingegen nur den aktuell vorliegenden Kenntnisstand berücksichtigen. Zudem erhöht die globale Perspektive die Komplexität des Themas. Bislang unveröffentlichte oder durch einzelne Staaten unter Verschluss gehaltene Daten können nicht miteinbezogen werden – beispielsweise zu den Lithiumvorkommen und Produktionskapazitäten oder der zukünftigen Absatzerwartung. Daher muss die Richtigkeit der getroffenen Annahmen und die Zuverlässigkeit der Resultate immer kritisch hinterfragt werden.

Zusätzlich wird der zukünftige Bedarf und die Verfügbarkeit von Lithium durch das Zusammenspiel von vielen Faktoren entschieden, die hier nicht alle vollumfänglich geprüft werden. Vor allem die zu erwartende Absatzentwicklung ist mit vielen Unsicherheiten verbunden und durch die Markteinflüsse der jeweiligen Regionen bestimmt. In dieser Beziehung spielen Kundenanforderungen u.a. an die E-Pkw-Preise, den flächendeckenden Ladeinfrastrukturausbau, Kilometerreichweiten, sowie das Mobilitätsverhalten eine entscheidende Rolle. Ebenso wirken sich staatliche Förderprogramme für die E-Mobilität und Gesetzesvorhaben zum Ausstieg aus dem Verbrennungsmotoren auf den weiteren Verlauf der weltweiten Neuzulassungen von E-Autos aus. Darüber hinaus können Fortschritte und Alternativen bei der Batterietechnologie einen Einfluss auf den tatsächlich notwendigen Lithiumbedarf nehmen.

Des Weiteren kann die Aussagekraft der Interpretation der Bedarfsdeckung durch die zusätzliche detaillierte Berücksichtigung von übrigen Anwendungsgebieten und Nutzungsinteressen von Lithium präzisiert werden. Wenn die Nachfrage in diesen Bereichen ebenfalls steigt, würde die Versorgungslage nochmals verschärft werden. Daher sollten in erster Linie die potenziellen Bedarfe von E-Bussen für den ÖPNV, E-Lkw für den Güterverkehr sowie stationäre Stromspeicher für Solarstromerzeugung von Haushalte separat geprüft und mit dem E-Pkw-Bedarf zusammengeführt werden.

Um die Versorgungssicherheit der Unternehmen zu gewährleisten, müssen abgesehen von Lithium auch weitere wichtige Batterierohstoffe und -komponenten für die Batterieherstellung berücksichtigt werden (u.a. Kobalt, Graphit, Mangan, Nickel). Daher sollten die Bedarfe und Verfügbarkeiten der übrigen Rohstoffe ebenfalls einer umfassenden Analyse unterzogen werden.

Abschließend ist eine Vertiefung der Umweltauswirkungen und die soziale Verträglichkeit im Zusammenhang mit der Rohstoffversorgung notwendig. Aus der Arbeit geht hervor, dass beim Abbau von Lithium CO₂-Emissionen und giftige Stoffe in die Natur freigesetzt werden und ein hoher Wasserverbrauch entsteht. Die Konsequenzen der Eingriffe in das Ökosystem stehen im Kontrast zu der Zielerreichung einer klimaneutralen Mobilität. Zusätzlich müssen die Arbeitsbedingungen in den Minen und sozialen Auswirkungen auf die Menschen vor Ort hinterfragt werden. Vor diesem Hintergrund sollte Recycling zunehmend als ergänzende Rohstoffquelle fokussiert werden. Insbesondere aufgrund von Taxonomien und steigenden CO₂-Preisen ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Recyclings gegenüber Primärrohstoffen maßgebend.

7 Fazit und Ausblick

Die Zielerreichung der globalen Reduktion von klimaschädlichen CO₂-Emissionen im Verkehrssektor erfordert eine Mobilitätswende. Aus diesem Grund nimmt die Bedeutung von batteriebetriebenen E-Pkw – also BEVs und PHEVs – auf dem Automobilmarkt in den kommenden Jahren immer stärker zu. Die vorliegende Arbeit setzt sich vor diesem Hintergrund mit dem erforderlichen Rohstoffbedarf an Lithium für die Batterieproduktion sowie den dafür zur Verfügung stehenden Ressourcen auf globaler Ebene auseinander.

Im Kontext dieser Ausarbeitung wird deutlich, dass Lithium aufgrund seiner elementaren Eigenschaften hervorragend für den Einsatz in wiederaufladbaren Batterien geeignet ist. Anhand der Wertschöpfungskette wird ersichtlich, dass die unterschiedlichen Methoden des Abbaus, die anschließende Aufbereitung sowie der Beschaffungsprozess insgesamt einen hohen Aufwand verursachen. Anschließend übernimmt das Lithium die Kernfunktion der Stromspeicherung in der Batterie, wodurch sich dessen zentrale Relevanz für die E-Mobilität herausstellt. Am Ende der Nutzungsdauer eines E-Fahrzeugs kann das Lithium durch Recycling wiedergewonnen werden und im Wertstoffkreislauf verbleiben.

Im Anschluss an die theoretischen Grundlagen wird der weltweite Lithiumbedarf im Rahmen der E-Mobilität bis zum Jahr 2035 analysiert. Dies erfolgt unter der Definition von einem wahrscheinlichen, einem niedrigen sowie einem hohen Nachfrageszenario. Die jeweiligen Ergebnisse des Lithiumbedarfs setzen sich aus der Kombination mehrerer Einflussgrößen zusammen. Die Untersuchung des zur Speicherung von 1 kWh erforderlichen Lithiumanteils in Verbindung mit der durchschnittlichen Pkw-Batteriekapazität ergibt ein Lithiumgewicht von etwa 4 bis 10 kg pro E-Auto. Unter Berücksichtigung des bei der Batteriezellenproduktion anfallenden Ausschusses muss nochmals mit einem um ca. 6 bis 19 % erhöhten Materialeinsatz gerechnet werden. Aufgrund steigender globaler Absatzzahlen kann 2035 im wahrscheinlichsten Szenario ein Bedarf von 343,4 kt pro Jahr (+395,6 %) Lithium entstehen.

Weiterführend werden die weltweiten Ressourcen, Reserven sowie die Produktion von Lithium untersucht. Daraus geht hervor, dass die derzeit bekannten und wirtschaftlich erschließbaren Vorkommen vor allem in Südamerika, Australien, China sowie den USA liegen. Aber auch in Europa und Afrika sind Fundstellen bekannt. Der Rohstoff wird daher in der hier betrachteten Zeitperiode bis 2035 und darüber hinaus voraussichtlich nicht erschöpft werden. Die eigentliche Herausforderung besteht in den Abbaumethoden zur Bereitstellung ausreichender jährlicher Lithiummengen aus den vorhandenen Ressourcen, welche sich auf die Länder Australien, Chile und China konzentrieren. Aufgrund der Erschließung neuer Quellen sowie steigender Produktionskapazitäten kann 2035 mit einer primären Verfügbarkeit von 626,8 kt (+480,6 %) im Jahr gerechnet werden. Darüber hinaus steigt das sekundäre Angebot mithilfe

von wiedergewonnenem Lithium aus Altbatterien und der Ausschussproduktion zunehmend an. Im Jahr 2035 könnte somit – je nach Szenario – ein zusätzliches Recyclingpotenzial in Höhe von mindestens 42,3 kt und bis zu 266,2 kt Lithium jährlich bereitgestellt werden.

Nachfolgend geht aus der Gegenüberstellung der Kurvenverläufe des Lithiumbedarfs mit der Verfügbarkeit hervor, dass die E-Mobilität einen hohen Einfluss auf die Gesamtnachfrage hat. Aus dem direkten Vergleich kann geschlussfolgert werden, dass der Bedarf voraussichtlich bis 2035 gedeckt werden kann, da das Angebot parallel zur Nachfrage hochläuft. Jedoch wird die Versorgung ab dem Jahr 2030 auf die Verfügbarkeit von recyceltem Lithium angewiesen sein. Langfristig gesehen zeigt die Prognose, dass sich das Verhältnis zwischen dem Bedarf und dem bereitgestellten Produktionsvolumen von Lithium insgesamt tendenziell verschärft.

Abschließend werden allgemeine Handlungsempfehlungen für Automobil- und Batteriehersteller auf Basis der Analyseergebnisse abgeleitet. Bedingt durch die Zunahme des Lithiumbedarfs und der Erhöhung der Produktionskapazitäten in den Minen kann es in den nächsten Jahren zu vorübergehenden angebotsseitigen Engpässen kommen. Daher sollten nachfragende Unternehmen den Fokus auf die Absicherung der eigenen Versorgung richten. In diesem Zusammenhang muss im Zuge des Beschaffungsprozesses bei der Lieferantwahl die Erfüllung von ausgewählten Kriterien berücksichtigt werden. Um möglichst viele Anforderungen sicher abzudecken, ist eine Diversifizierungsstrategie bei der Auswahl der Lieferanten empfehlenswert. Das Gesamtkonzept sollte so gestaltet werden, dass der Hauptlieferant global aus einem der produktionsstarken Länder Australien, Chile oder China ausgewählt wird und damit hohe Lithiumkapazitäten bei vergleichsweise niedrigen Preisen zur Verfügung stellt. Zur Vermeidung von Fertigungsausfällen in Folge von Engpässen sollte die Entscheidung zusätzlich auf die Wahl eines lokalen Zulieferers fallen – vorausgesetzt dies ist geografisch möglich. Dadurch können sowohl ein reduzierter Logistikaufwand als auch ein geringeres geopolitisches Risiko erreicht werden. Darüber hinaus kann eine dritte Bezugsquelle aus dem Recycling die Einhaltung von ESG-Zielen gewährleisten und zu einer nachhaltigen Rohstoffbeschaffung beitragen.

Die im Rahmen der Arbeit erworbenen Erkenntnisse zeigen, dass die E-Mobilität einen hohen anteiligen Bedarf an den verfügbaren Lithiumressourcen erfordert, welcher durch die verfügbaren Minen- und Recyclingquellen voraussichtlich gedeckt werden kann. Jedoch wird diese Aussage vorbehaltlich neuer Erkenntnisse und Daten getroffen, denn die Marktentwicklung wird von vielen Faktoren beeinflusst. Weiterführend sollten zudem die Bedarfsentwicklungen aller Lithium-Anwendungsgebiete, weitere relevante Batterierohstoffe sowie die Wirtschaftlichkeit des Recyclings tiefergehend untersucht werden.

8 Literaturverzeichnis

- ABB21 Asea Brown Boveri (2021) *Electric Vehicle Battery Supply Chain Analysis*. Zugriff am 09.02.2024 unter: https://new.abb.com/docs/librariesprovider89/default-document-library/automotive-battery-supply-chain-analysis-2021-final_abb_ams---abridged-version-docx.pdf?sfvrsn=3bc9f708_2
- AGO17 Agora Verkehrswende (2017) *Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität*. Zugriff am 11.01.2024 unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Nachhaltige_Rohstoffversorgung_Elektromobilitaet/Agora_Verkehrswende_Synthesepapier_WEB.pdf
- ALB24 Albemarle Corporation (2024) *Lithiumsalze*. Zugriff am 20.02.2024 unter: <https://www.albemarle.de/products/lithiumsalze>
- ALT24 Alt, R. (2024) *Sourcing*. Zugriff am 26.02.2024 unter: <https://www.gabler-banklexikon.de/definition/sourcing-70690#:~:text=Begriff%3A%20Abgeleitet%20vom%20englischen%20Wort,f%C3%BCr%20ein%20oder%20mehrere%20Unternehmen>
- ARN22 Arnolds, A. et. al. (2022) *Materialwirtschaft und Einkauf, 14. Auflage*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Möchengladbach: DOI: 10.1007/978-3-658-30474-4
- ASS23 Aßmann, A. et. al. (2023) *Europa und das kritische Metall Lithium: Zwischen Bedarfsexplosion und Recycling-Realität*. Zugriff am 11.02.2024 unter: <https://www.mdr.de/wissen/green-deal-projekt-lithium-100.html>
- AZE22 Azevedo, M. et. al. (2022) *Lithium mining: How new production technologies could fuel the global EV revolution*. Zugriff am 03.02.2024 unter: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/lithium-mining-how-new-production-technologies-could-fuel-the-global-ev-revolution>
- BAL23 Balakrishnan, A.; Neef, C. (2023) *Preisschwankungen bei Batterie-Rohstoffen: Wie die Automobilindustrie reagiert und welche Auswirkungen sie auf die Zellkosten haben*. Zugriff am 16.02.2024 unter: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/batterie-rohstoffe-preis-schwankungen-wie-reagiert-automobil-industrie-auswirkungen-zellkosten.html>
- BAU23 Baumann, J. (2023) *Wichtiger Rohstoff für E-Autos reicht laut Studie nur noch 11 Jahre*. Zugriff am 07.01.2024: <https://www.bw24.de/auto/e-autos/wichtiger-rohstoff-fuer-e-autos-reicht-laut-studie-nur-noch-11-jahre-91193782.html>
- BGT23 Baumgarten, R. (2023) *Die Schattenseiten der Verkehrswende*. Zugriff am 28.01.2024 unter: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/weltwirtschaft/lithiumabbau-argentinien-100.html>
- BIN24 Businessinsider (2024) *Gegen Chinas Vormacht: USA und Microsoft finden mit Künstlicher Intelligenz Material, das Lithium in Batterien ersetzen könnte*. Zugriff am 10.02.2024 unter: <https://www.businessinsider.de/wirtschaft/lithium-batterien-usa-und-microsoft-finden-mit-ki-material-das-lithium-abhaengigkeit-von-china-mindern-soll/>
- BLO22 Bloomberg (2022) *Global long-term passenger EV sales by market*. Zugriff am 18.01.2024 unter: <https://bnef.turtl.co/story/evo-2022/page/4/1>

- BLO23 Bloomberg (2023) *Electric Vehicle Outlook*. Zugriff am 18.01.2024 unter: https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/2431510_BNEFElectricVehicleOutlook2023_ExecSummary.pdf
- BMBF23 Bundesministerium für Bildung und Forschung (2023) *BMBF-Dachkonzept Batterieforschung*. Zugriff am 03.02.2024 unter: https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/downloads/files/bmbf-dachkonzept-batterieforschung-2023.pdf?__blob=publicationFile&v=5#:~:text=Das%20Dachkonzept%20Batterieforschung%20ist%20die,einer%20wett%20bewerbsf%C3%A4higen%20zirkul%C3%A4ren%20Wirtschaft
- BMUV20 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2020) *Ressourcenbilanz: Welchen Rohstoffbedarf haben Elektroautos?* Zugriff am 24.02.2024 unter: <https://www.bmuv.de/themen/verkehr/elektromobilitaet/ressourcenbilanz>
- BMUV24 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2024) *Was ist die EU-Taxonomie?* Zugriff am 26.02.2024 unter: <https://www.bmuv.de/faq/was-ist-die-taxonomie>
- BMWK24a Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024) *Elektromobilität (Definition i.S. der Bundesregierung)*. Zugriff am 18.02.2024 unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/glossar/elektromobilitaet-definition-der-bundesregierung>
- BMWK24b Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024) *Rohstoffe – unverzichtbar für den Zukunftsstandort Deutschland*. Zugriff am 02.02.2024 unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/rohstoffe-und-ressourcen.html>
- BOH20 Bookhagen, D.; Bastian, D. (2020) *Metalle in Smartphones*. Zugriff am 07.02.2024 unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/65_smartphones.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- BOT13 Bottke, P. (2013) *Primäre und wiederaufladbare Lithium-Ionen-Batterien*. Zugriff am 21.02.2024 unter: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/ICTM/education/downloads/Skript_Lithium-Ionen-Batterien.pdf
- CHE24a Chemie.de (2024) *Lithium*. Zugriff am 17.02.2024 unter: <https://www.chemie.de/lexikon/Lithium.html>
- CHE24b Chemie.de (2024) *Atommasse*. Zugriff am 24.02.2024 unter: <https://www.chemie.de/lexikon/Atommasse.html#:~:text=Aufgrund%20der%20sehr%20kleinen%20Zahlenwerte,in%20g%20sind%20folglich%20identisch>
- CHE24c Chemie.de (2024) *Spodumen*. Zugriff am 18.02.2024 unter: [https://www.chemie.de/lexikon/Spodumen.html#:~:text=Spodumen%20ist%20ein%20eher%20selten,LiAl\(SiO3\)2](https://www.chemie.de/lexikon/Spodumen.html#:~:text=Spodumen%20ist%20ein%20eher%20selten,LiAl(SiO3)2)
- CHE24d Chemie.de (2024) *Petalit*. Zugriff am 18.02.2024 unter: <https://www.chemie.de/lexikon/Petalit.html>
- DCS24 Die Chemie Schule (2024) *Oxide*. Zugriff am 07.02.2024 unter: <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Oxide>

- DEL20 Deloitte (2020) *Electric vehicles - Setting a course for 2030*. Zugriff am 14.01.2024 unter: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/22869-electric-vehicles/DI_Electric-Vehicles.pdf
- DERA21 Deutsche Rohstoffagentur (2021) *DERA Rohstoffinformationen*. Zugriff am 12.01.2024 unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- DERA23 Deutsche Rohstoffagentur (2023) *Rohstoffrisikobewertung - Lithium*. Zugriff am 16.01.2024 unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-54.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- DES19 Statistisches Bundesamt (2019) *Basistabelle Arbeitskosten im Verarbeitenden Gewerbe*. Zugriff am 25.02.2024 unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Internationales/Thema/Tabellen/Basistabelle_Arbeitskosten.html
- DLF24 Deutschlandfunk (2024) *Warum greifen Huthi-Rebellen Schiffe im Roten Meer an?* Zugriff am 24.02.2024 unter: <https://www.deutschlandfunk.de/warum-greifen-huthi-rebellen-schiffe-im-roten-meer-an-100.html>
- DOP20 Doppelbauer, M. (2020) *Grundlagen der Elektromobilität - Technik, Praxis, Energie und Umwelt*. Springer Vieweg, Karlsruhe. DOI: 10.1007/978-3-658-29730-5
- ECO22 Ecomento (2022) *Analyse: Batterie-Recycling noch viele Jahre auf Ausschuss aus Fabriken angewiesen*. Zugriff am 20.01.2024 unter: <https://ecomento.de/2022/10/06/batterie-recycling-noch-viele-jahre-auf-ausschuss-aus-fabriken-angewiesen-analyse/>
- ETO24 Etoro Academy (2024) *Was beeinflusst den Preis von Rohstoffen?* Zugriff am 20.02.2024 unter: <https://www.etoro.com/de/investing/what-affects-commodity-prices/#:~:text=Die%20wichtigsten%20Faktoren%20f%C3%BCr%20die,Nachfrage%20auf%20die%20Preisbildung%20aus>
- ETT22 Ettmann, C. (2022) *ESG: Herausforderung im Einkauf*. Zugriff am 23.02.2024 unter: <https://beschaffung-aktuell.industrie.de/lieferantenmanagement/esg-herausforderung-im-einkauf/>
- FAS23 Fastmarkets (2023) *The automotive supply chain: A guide to strategically sourcing raw materials*. Zugriff am 09.02.2024 unter: <https://www.fastmarkets.com/insights/a-guide-to-strategically-sourcing-raw-materials/>
- FEL17 Felixberger, J. (2017) *Chemie für Einsteiger*. Springer-Verlag GmbH Deutschland, Augsburg. DOI: 10.1007/978-3-662-52821-1
- FOC23 Focus online (2023) *Wie China-Zölle unsere Energiewende ausbremsen*. Zugriff am 24.02.2024 unter: https://www.focus.de/earth/news/staaten-fahren-schranken-hoch-die-energiewende-droht-im-zoll-stecken-zu-bleiben_id_190919960.html

- FRH18 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (2018) *Energiespeicher-Monitoring*. Zugriff am 14.01.2024 unter: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/Energiespeicher-Monitoring_2018.pdf
- FRH21 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (2021) *Quantifizierung Batterierecycling - Kurzversion*. Zugriff am 02.02.2024 unter: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/9efc8e14-807a-432a-a715-6235c718ab0e/content>
- FRH22 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (2022) *Solid-State Battery Roadmap 2035+*. Zugriff am 07.02.2024 unter: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2022/SSB_Roadmap.pdf
- FRH23 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (2023) *Rohstoffgewinnung*. Zugriff am 10.01.2024 unter: <https://metamarketmonitoring.de/de/rohstoffe/?&f2=0&f3=2&f4=0&f5=0,1,2,3&f6=20>
- FRI23 Fritz, A. (2023) *Die Elektromobilität weltweit auf dem Vormarsch*. Zugriff am 09.01.2024 unter: <https://www.vda.de/de/themen/elektromobilitaet/marktentwicklung-europa-international>
- FTZ23 Fritz, D. et al. (2023) *Rohstoffe der Elektromobilität - Kurzstudie zur Analyse derzeitiger und möglicher künftiger Rohstoffabhängigkeiten von Elektrofahrzeugen*. Zugriff am 12.02.2024 unter: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0850.pdf>
- GAB24 Gabler Wirtschaftslexikon (2024) *Szeanrio-Technik*. Zugriff am 22.02.2024 unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/szenario-technik-50281>
- GCC22 Green Car Congress (2022) *Benchmark world needs more than 300 new mines by 2035 to keep up with Li-ion battery demand; need for recycling*. Zugriff am 03.02.2024 unter: <https://www.greencarcongress.com/2022/09/20220910-benchmark.html#:~:text=Demand%20for%20lithium%2Dion%20batteries,a%20new%20analysis%20by%20Benchmark>
- GDT23a Global Data (2023) *Government mandates and infrastructure investments to fuel EV growth globally, says GlobalData*. Zugriff am 13.01.2024 unter: <https://www.globaldata.com/media/power/government-mandates-infrastructure-investments-fuel-ev-growth-globally-says-globaldata/>
- GDT23b Global Data (2023) *New mines and capacity expansions to boost global lithium production over the decade*. Zugriff am 26.01.2024 unter: <https://www.mining-technology.com/analyst-comment/lithium-global-production-forecast-2023/?cf-view&cf-closed>
- GES24 Geßner, F. (2024) *Devisen*. Zugriff am 25.02.2024 unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/devisen-29714#:~:text=Devisen%20i.w.S.%3A%20Anspr%C3%BChe%20auf%20Zahlungen,Ausland%20zahlbaren%20Schecks%20und%20Wechseln>
- GIZ21 Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (2021) *Rohstoffe für E-Mobilität - Entwicklungspolitische Perspektiven*. Zugriff am 11.01.2024 unter: <https://www.bmz.de/resource/blob/86342/rohstoffe-fuer-e-mobilitaet.pdf>

- GLI24 Global Lithium (2024) *Lithium Market*. Zugriff am 12.02.2024 unter: <https://globallithium.com.au/lithium-market/>
- GMS23 Goldman Sachs (2023) 2035 – *Jeder Zweite fährt elektrisch*. Zugriff am 13.01.2024 unter: <https://www.gs.de/de/articles/elektromobilitaet-2035-jeder-zweite-faehrt-elektrisch>
- GRV23 Grohol, M.; Veeh, C. (2023) *Study on the critical raw materials for the EU*. Publications Office of the European Union, Luxemburg. DOI: 10.2873/725585
- GUE24 Günther, E. (2024) *Erneuerbare Energien*. Zugriff am 18.02.2024 unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/erneuerbare-energien-53729>
- HAB24 Haberstock, P. (2024) *ESG-Kriterien*. Zugriff am 23.02.2024 unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/esg-kriterien-120056>
- HAE23 Härter, H. (2023) *China kauft die Hälfte aller Lithium-Minen weltweit*. Zugriff am 02.02.2024 unter: <https://www.elektronikpraxis.de/globaler-wettbewerb-lithiummarkt-usa-china-a-24382bde120ec4a86997671bf4a25ac8/>
- HAR23 Harloff, T.; Conrad, B. (2023) *Vulcan Energie nimmt erste Anlage in Betrieb*. Zugriff am 20.02.2024 unter: <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/lithium-elektroauto-akkus-deutschland-oberrheingraben/>
- HEI23 Heise online (2023) *Batterien für Elektroautos Teil 3: Die Zukunft - Natrium statt Lithium*. Zugriff am 10.02.2024 unter: <https://www.heise.de/hintergrund/Batterien-fuer-Elektroautos-Teil-3-Die-Zukunft-Natrium-statt-Lithium-7492595.html>
- HES20 Hedderich, J.; Sachs, L. (2020) *Angewandte Statistik - Methodensammlung mit R*, 17. Auflage. Springer-Verlag GmbH Deutschland, Großenaspe. DOI: 10.1007/978-3-662-62294-0.
- HOC24 Hochwarth, D. (2024) *Feststoffbatterien: E-Autos mit über 1.000 km Reichweite und 500.000 km Lebensdauer möglich*. Zugriff am 07.02.2024 unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/verkehr/feststoffbatterien-machen-sie-das-e-auto-fit-fuer-die-zukunft/>
- HOL24 Holland, H. (2024) *Interpolation*. Zugriff am 02.02.2024 unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/interpolation-41549>
- HRE20 Hendrich, A.; Reuter, B. (2020) *Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe für Elektrofahrzeuge*. Automobiltechnische Zeitschrift, Vol. 122, S. 54–57
- IMAS23 International Mine Action Standards (2023) *Glossary of mine action terms, definitions and abbreviations*. Zugriff am 02.02.2024 unter: <https://www.mineactionstandards.org/standards/04-10/>
- IRE22 International Renewable Energy Agency (2022) *Critical Materials for the Energy Transition: Lithium*. Zugriff am 18.01.2024 unter: [https://www.irena.org/-/media/Irena/Files/Technical-papers/IRENA_Critical_Materials_Lithium_2022.pdf?rev=acb7d0a37ec748758054920dc82dbc0a#:~:text=The%20best%20estimate%20for%20the,kWh%20\(Martin%2C%202017\)](https://www.irena.org/-/media/Irena/Files/Technical-papers/IRENA_Critical_Materials_Lithium_2022.pdf?rev=acb7d0a37ec748758054920dc82dbc0a#:~:text=The%20best%20estimate%20for%20the,kWh%20(Martin%2C%202017))

- IRE23 International Renewable Energy Agency (2023) *Diversifizierung der Lieferketten für kritische Rohstoffe minimiert geopolitische Risiken*. Zugriff am 21.02.2024 unter: <https://www.irena.org/News/pressreleases/2023/Jul/Diversifying-Critical-Material-Supply-Chains-Minimises-Geopolitical-Risks-DE>
- IST21 Ista (2021) *CO2-Preis in Deutschland: Was kommt auf uns zu?* Zugriff am 27.02.2024 unter: <https://www.ista.com/de/unternehmen/themenwelt/co2-preis-in-deutschland-was-kommt-auf-uns-zu/#:~:text=Der%20Preis%20liegt%20derzeit%20bei,etwa%207%20Cent%20in%20Polen>
- JOC24 Jochem, P. (2024) *Fossile Energieträger*. Zugriff am 18.02.2024 unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/fossile-energie-traeger-34855>
- KAM24 Kamps, U. (2024) *Prognose*. Zugriff am 22.02.2024 unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/prognose-43498>
- KBS24 KBS World German (2024) *Thailand korrigiert Angaben zu Lithium-Fund*. Zugriff am 25.01.2024 unter: https://world.kbs.co.kr/service/contents_view.htm?lang=g&board_seq=448960
- KHE24 Kampker, A.; Heimes, H. H. (Hrsg.) (2024) *Elektromobilität - Grundlagen einer Fortschrittstechnologie*, 3. Auflage. Springer Vieweg, Aachen. DOI: 10.1007/978-3-662-65812-3
- KIR24 Kirchgeorg, M. (2024) *Absatz*. Zugriff am 15.01.2024: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/absatz-29637>
- KKL08 Kinkel, S. et. al. (Hrsg.) (2008) *Wertschöpfungs- und Innovationspotenziale deutscher Mittelständler*. Zugriff am 24.02.2024 unter: <https://public-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/b434e567-b14a-4fd4-87b7-e411a1e5fd82/content>
- KNO23 Knoll, C. (2023) *Forschung aktuell*. Podcast deutschlandfunk. Sendung vom 04.09.2023
- KOE21 Köllner, C. (2021) *Faktencheck Elektroauto-Batterien*. Zugriff am 09.01.2023 unter: <https://www.springerprofessional.de/batterie/elektrofahrzeuge/faktencheck-elektroauto-batterien/17624376>
- KOE22 Köllner, C. (2022) *Digitalisierte Batteriezellenproduktion schont Ressourcen*. Zugriff am 09.01.2024 unter: <https://www.springerprofessional.de/batterie/produktion---produktionstechnik/digitalisierte-batteriezellenproduktion-schont-ressourcen/23367012>
- KOS23 Koska, T. (2023) *Nachhaltige Mobilität - Die Herausforderungen einer Verkehrswende*. Zugriff am 24.02.2024 unter: <https://www.bpb.de/themen/klimawandel/dossier-klimawandel/516500/nachhaltige-mobilitaet/>
- KRI24 Krieger, W. (2024) *Beschaffung*. Zugriff am 19.02.2024 unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/beschaffung-30913>
- KUC22 Küçükay, F. (2022) *Grundlagen der Fahrzeugtechnik*. Springer Verlag, Braunschweig. DOI: 10.1007/978-3-658-36727-5

- KUE23 Kühnappel, J. B. (2023) *Vertriebsprognosen - Methoden für die Praxis*, 2. Auflage. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-42876-1
- KUT23 Kutzner, S. (2023) *Nicht nur die EU: Verbrennerverbot wird in vielen Ländern diskutiert*. Zugriff am 24.02.2024 unter: <https://correctiv.org/faktencheck/2023/04/19/nicht-nur-die-eu-verbrennerverbot-wird-in-vielen-laendern-diskutiert/>
- LAM17 Lange, T.; Mosler, K. (2017) *Statistik kompakt - Basiswissen für Ökonomen und Ingenieure*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Merseburg. DOI: 10.1007/978-3-662-53467-0.
- LAN24 Lang, P. (2024) *Das wär doch mal ein ID.1*. Zugriff am 06.02.2024 unter: <https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/jac-yiwei-sehol-e10x-natrium-batterie-serie/>
- LAS22 Lasch, R. (2022) *Strategisches und operatives Logistikmanagement: Beschaffung*, 4. Auflage. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Dresden. DOI: 10.1007/978-3-658-39384-7
- LEI23 Leichsenring, J.; Rudschies, W (2023) *Ausstieg Verbrennungsmotor: Wann wird welcher Hersteller elektrisch?* Zugriff am 24.02.2024 unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/auto/ausstieg-verbrennungsmotor/>
- LYA23 Lyall, I. (2023) *Mining 101: The importance of the definitive feasibility study*. Zugriff am 02.02.2024 unter: <https://www.proactiveinvestors.co.uk/companies/news/1032055/mining-101-the-importance-of-the-definitive-feasibility-study-1032055.html>
- MAE19 März, O. (2019) *Lithium und Kobalt in Elektroauto-Akkus: Alle Infos*. Zugriff am 06.01.2024 unter: https://efahrer.chip.de/e-wissen/lithium-und-kobalt-in-elektroauto-akkus-alle-infos-1_101116#:~:text=Demnach%20werden%20f%C3%BCr%20einen%2050,abgebaut%20werden%20%2D%20mit%20steigender%20Tendenz
- MAE22 März, O. (2022) *FCEV, PHEV, HEV und BEV: Dafür stehen die Abkürzungen der E-Autos*. Zugriff am 24.02.2024 unter: https://efahrer.chip.de/e-wissen/fcev-phev-hev-und-bev-dafuer-stehen-die-abkuerzungen-der-e-autos_107773
- MAI23 Maisch, M. (2023) *CATL: Staying on top of the battery game*. Zugriff am 07.02.2024 unter: <https://www.pv-magazine.com/2023/12/01/catl-staying-on-top-of-the-battery-game/>
- MAZ22 Mazar, G. (2022) *Geopolitische Risiken: Strategien gegen Rohstoff-Abhängigkeit*. Zugriff am 26.02.2024 unter: <https://klardenker.kpmg.de/strategie-der-globalen-energiewende/>
- MEF24 Meffert, H. et. al. (2024) *Marketing - Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung*, 14. Auflage. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Münster. DOI: 10.1007/978-3-658-41755-0
- MEY22 Meyer, H. (2022) *Benzin, Diesel, Elektro & Co.: Antriebsarten im Überblick*. Zugriff am 18.02.2024 unter: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/alternative-antriebe-uebersicht/>

- MRO23 Mrowka, M. (2023) *Lithium-Preis auf 2-Jahres-Tief – Wie geht es weiter mit Aktien von Albemarle, SQM, Livent und Co?* Zugriff am 21.02.2024 unter: <https://www.boerse-online.de/nachrichten/rohstoffe/lithium-preis-auf-2-jahres-tief-wie-geht-es-weiter-mit-aktien-von-albemarle-sqm-livent-und-co-20342648.html>
- MSC24 Marketscreener (2024) *Thailand will in zwei Jahren mit der Produktion von Lithium beginnen und damit seine Ambitionen für Elektrofahrzeuge verstärken.* Zugriff am 25.01.2024 unter: <https://ch.marketscreener.com/kurs/rohstoff/SILVER-16221/news/Thailand-will-in-zwei-Jahren-mit-der-Produktion-von-Lithium-beginnen-und-damit-seine-Ambitionen-fur-45800590/>
- NED24 Neißendorfer, M. (2024) *E-Auto-Absatzrends: Rekordzahlen in allen großen Märkten.* Zugriff am 24.02.2024 unter: <https://www.elektroauto-news.net/news/e-auto-absatz-weltweit-rekord>
- NEI23 Neitzel, D. (2023) *Lithium: Wie teuer ist der Rohstoff und woher bekommen wir ihn?* Zugriff am 20.02.2024 unter: <https://www.technik-einkauf.de/rohstoffe/kritische-rohstoffe/rohstoff-dossier-lithium-der-schatz-im-salzsee-279.html>
- NOW23 Now GmbH (2023) *Factsheet: Elektromobilität und Rohstoffe - Bedarfe und Verfügbarkeiten.* Zugriff am 10.01.2024 unter: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2023/03/NOW_Factsheet-Elektromobilitaet-und-Rohstoffe.pdf
- NPM19 Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (2019) *Zwischenbericht zur Wertschöpfung.* Zugriff am 24.02.2024 unter: <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/03/NPM-AG-4-1-Zwischenbericht-zur-Wertsch%C3%B6pfung.pdf>
- NUM21 Numan, A. et. al. (2021) *Battery Material.* Zugriff am 03.02.2024 unter: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/battery-material>
- OECD24 Organisation for Economic Cooperation and Development (2024) *Country Risk Classifications of the Participants to the Arrangement on Officially Supported Export Credits.* Zugriff am 25.02.2024 unter: <https://www.oecd.org/trade/topics/export-credits/documents/cre-crc-current-english.pdf>
- OEI23 Öko-Institut e.V. (2023) *Bedarf strategischer Rohstoffe für den Pkw- und Lkw-Sektor in Deutschland bis 2040.* Zugriff am 12.01.2024 unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Rohstoffbedarf-PKW-LKW-Szenarien-D.pdf>
- PAVB21 RWTH Aachen, TU Braunschweig, Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau (2021) *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien.* Zugriff am 11.02.2024 unter: https://www.vdma.org/c/document_library/get_file?uuid=479ae54b-5b43-cfff-df4f-f359e79c8eb5&groupId=34570
- PAVB23 RWTH Aachen, TU Braunschweig, Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau (2023) *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien, 2. Auflage.* Zugriff am 03.02.2024 unter: <https://www.vdma.org/documents/34570/35405938/Brosch%C3%BCre%20Batterierecycling.pdf/fc6ad148-5dd5-1c16-79b6-2c776581149a?filename=Brosch%C3%BCre%20Batterierecycling.pdf>

- PIE24 Pieckenbrock, D. (2024) *Extrapolation*. Zugriff am 02.02.2024 unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/extrapolation-35539>
- POL23 Poll, D. (2023) *Das sind die 3 Hebel für eine effizientere Batteriefertigung*. Zugriff am 08.02.2024 unter: <https://www.produktion.de/technik/co2-neutrale-industrie/das-sind-die-3-hebel-fuer-eine-effizientere-batteriefertigung-871.html>
- PSI23 Pistilli, M. (2023) *What are Prefeasibility and Feasibility Studies?* Zugriff am 02.02.2024 unter: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/prefeasibility-feasibility-studies/>
- PV23 Char of Production Engineering of E-Mobility Components (RWTH Aachen University), Verband Deutscher Maschinenbau (2023) *Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batterie*. Zugriff am 20.01.2024 unter: <https://vdma.org/documents/34570/35405938/Produktionsprozess+einer+Lithium-Ionen-Batterie.pdf/2ddfa92f-f0c9-6ab3-4a58-c448537ebbf1?t=1677224823034>
- REC20 Recyclingnews (2020) *Mieten statt kaufen: Renault schließt den Batteriekreislauf*. Zugriff am 15.02.2024 unter: <https://www.recyclingnews.de/rohstoffe/mieten-statt-kaufen-renault-schliesst-den-batteriekreislauf/>
- REY23 Reyes, R. (2023) *Lithium deposit found in US McDermitt Caldera may be world's largest*. Zugriff am 28.01.2024 unter: <https://nypost.com/2023/09/11/lithium-deposit-found-in-us-mcdermitt-caldera/>
- RFS23 Renault Finacial Services (2023) *Tarife*. Zugriff am 15.02.2024 unter: <https://www.renaultfs.de/batteriemiettarife>.
- ROE23 Rödl & Partner (2023) Themenspecial: Lieferkettengesetz international. Zugriff am 24.02.2024 unter: <https://www.roedl.de/themen/lieferkettengesetz-international/>
- RUD23 Rudschies, W. (2023) *Elektroauto-Akkus: So funktioniert das Recycling*. Zugriff am 26.01.2024 unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-akku-recycling/>
- RWTH23 RWTH Aachen (2023) *Studie zu Batterie-Recycling in der EU: Neun Milliarden Euro bis 2035 notwendig*. Zugriff am 17.01.2024 unter: <https://www.pem.rwth-aachen.de/cms/pem/der-lehrstuhl/presse-medien/aktuelle-meldungen/~bcztzr/studie-zu-batterie-recycling-in-der-eu/>
- SAC23 Sackmann, C. (2023) *Drei Wege, wie das E-Auto durch das Rohstoff-Nadelöhr kommt*. Zugriff am 07.01.2024 unter: https://www.focus.de/auto/elektroauto/knappe-vorkommen-problematische-foerderung-lithium-kobalt-nickel-wo-die-rohstoffe-fuer-die-e-auto-wende-herkommen-sollen_id_184540748.html
- SCH20 Schäfer, R. (2020) *Der neue Rohstoff-Hunger durch Elektromobilität*. Zugriff am 29.12.2023. Unter: <https://www.planet-wissen.de/technik/verkehr/elektromobilitaet/elektromobilitaet-rohstoffe-100.html#:~:text=Je%20nach%20Bauart%20stecken%20in,leicht%20doppelt%20so%20viel%20sein>
- SCR19 Schröder, C. (2019) *Industrielle Arbeitskosten im internationalen Vergleich*. IW-Trends - Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung. Vol. 46, S. 63-81. DOI: 10.2373/1864-810X.19-02-05

- SFL24a Studyflix (2024) *Boxplot*. Zugriff am 17.01.2024 unter: <https://studyflix.de/statistik/boxplot-1044>.
- SFL24b Studyflix (2024) *Mittelwert, Median & Modus*. Zugriff am 17.01.2024 unter: <https://studyflix.de/statistik/mittelwert-median-and-modus-1037>
- SFL24c Studyflix (2024) *Sulfid*. Zugriff am 07.02.2024 unter: <https://studyflix.de/chemie/sulfide-3329>
- SMD20 Schmid, M. (2020) *Unternehmerische Rohstoffstrategien*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Halle. DOI: 10.1007/978-3-658-29007-8
- SPI24 Spiegel Mobilität (2024) *In China rollen erste Elektroautos mit Natriumakkus vom Band*. Zugriff am 06.02.2024 unter: <https://www.spiegel.de/auto/natrium-ionen-batterie-chinesischer-hersteller-jac-produziert-erstes-elektroauto-mit-billigakku-a-7ae8a8-3bf2-4e66-9db9-f8ae739fdb6d>
- STA23a Statista Market Insights (2023) *Elektrofahrzeuge - Weltweit*. Zugriff am 13.01.2024 unter: <https://de.statista.com/outlook/mmo/elektrofahrzeuge/weltweit#absatz>
- STA23b Statista (2023) *Weltweite Produktionsmenge von Lithium im Zeitraum 2010 bis 2022*. Zugriff am 23.01.2024 unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1357771/umfrage/weltweite-produktion-von-lithium/#:~:text=Im%20Jahr%202022%20wurden%20weltweit,2022%20Australien%2C%20Chile%20und%20China>
- STA24 Statista (2024) *Minenproduktion von Lithium nach den wichtigsten Ländern im Jahr 2023*. Zugriff am 02.02.2024 unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/159929/umfrage/minenproduktion-von-lithium-nach-laendern/>
- STL23a Stahl, T. (2023) *Festkörperbatterien als Game Changer: Was Porsche-Ingenieure entdeckt haben*. Zugriff am 10.02.2024 unter: https://efahrer.chip.de/news/festkoerperbatterien-als-game-changer-was-porsche-ingenieure-entdeckt-haben_1014737
- STL23b Stahl, T. (2023) *Womöglich größtes Lithiumvorkommen der Welt entdeckt: Schon regt sich Widerstand*. Zugriff am 02.02.2024 unter: https://efahrer.chip.de/news/womoeglich-groesstes-lithiumvorkommen-der-welt-entdeckt-schon-regt-sich-widerstand_1014991
- STR24 Strobl, G. (2024) *Welche Rolle China bei der Talfahrt der Lithiumpreise spielt*. Zugriff am 23.02.2024 unter: <https://www.derstandard.de/story/3000000204743/welche-rolle-china-bei-der-talfahrt-der-lithiumpreise-spielt>
- TAG23a Tagesschau (2023) *Europäischer Gaspreis gestiegen*. Zugriff am 24.02.2024 unter: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/konjunktur/gasmarkt-ttf-russland-revolte-rohstoffe-gaspreis-100.html>
- TAG23b Tagesschau (2023) *Erfolg bei neuer Batterietechnologie*. Zugriff am 06.02.2023 unter: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/northvolt-natrium-ionen-batterien-energiewende-nachhaltigkeit-elektroautos-100.html>
- TES23 Teslamag (2023) *Natrium-Ionen-Akkus für kleine Elektroautos: BYD will Fabrik mit weltweit höchster Kapazität*. Zugriff am 06.02.2024 unter: <https://teslamag.de/news/natrium-ionen-batterien-kleine-elektroautos-byd-fabrik-30-gwh-62640>

- THI20 Thielmann, A. et. al. (2020) *Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf*. Zugriff am 06.01.2024 unter: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/Faktencheck-Batterien-fuer-E-Autos.pdf>
- THO23 Thome, M. (2023) *Wo die Welt ihr Lithium abbaut – und wer darunter leidet*. Zugriff am 14.02.2024 unter: <https://www.geo.de/wissen/forschung-und-technik/folgen-des-lithiumabbaus-in-suedamerika--australien--europa-33768060.html>
- THP23 ten Hompel, M. et. al. (Hrsg.): *Batterie-Logistik*. Fraunhofer Publica, Dortmund. DOI: 10.24406/publica-1247
- TSB24 Tagesspiegel Background (2024) *Thailand verkündet Fund großer Lithium-Vorkommen*. Zugriff am 25.01.2024 unter: <https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/thailand-verkuendet-fund-grosser-lithium-vorkommen>
- UBR24 Universität Bremen (2024) *Silikate und Germanate*. Zugriff am 29.01.2024 unter: <https://www.geo.uni-bremen.de/projektarbeiten/Lucy-Schlicht/silger.html#:~:text=Allgemein%3A%20Lepidolith%20geh%C3%B6rt%20zur%20Klasse,gut%20ausgebildete%20Kristalle%20selten%20sind>
- USGS20 U.S. Geological Survey (2020) *Mineral Commodity Summaries 2020*. Zugriff am 28.01.2024 unter: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>
- USGS23 U.S. Geological Survey (2023): *Lithium*. Zugriff am 23.01.2024 unter: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-lithium.pdf>
- USGS24 U.S. Geological Survey (2024) *Mineral Commodity Summaries 2024*. Zugriff am 23.02.2024 unter: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024.pdf>
- VCE24 Vulcan Energy (2024) *Zero Carbon Lithium*. Zugriff am 18.02.2024 unter: <https://v-er.eu/de/>
- VDMA23 VDMA Batterieproduktion (2023) *Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030*. Zugriff am 10.01.2024 unter: https://vdma.org/documents/34570/35405938/VDMA+Batterieproduktion_Roadmap_2023.pdf/ee2452cd-ed44-93bf-4762-6a09ce29b4b7?t=1683038844317
- VOG22 Vogt, J. (2022) *Globaler Run auf Lithium*. Zugriff am 31.01.2024 unter: <https://www.suedwind-magazin.at/globaler-run-auf-lithium/#:~:text=Chiles%20fr%C3%BCher%20Zufallsfund.,auch%20nicht%20s,eine%20heutigen%20Dimension>
- VOI24 Voigt, K.-I. (2024) *Economics of Scale*. Zugriff am 26.02.2024 unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/economies-scale-36167>
- VW24 Volkswagen AG (2024) *MEB: Batterie mit System*. Zugriff am 21.02.2024 unter: <https://www.volkswagen.at/elektroauto/id-technologie/batterie-mit-system>
- WAC22 Wachs, S. (2022) *Lithium-Mine ab 2027 in Frankreich*. Zugriff am 02.02.2024 unter: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/imerys-rohstoff-lithium-batterien-frankreich-101.html>
- WAL23 Wallner, I. (2023) *Lithium-Ionen-Akku im E-Auto: Das sollte man über die Elektroauto-Batterie wissen*. Zugriff am 07.01.2024 unter: <https://www.carwow.de/ratgeber/elektroauto/lithium-ionen-akku-im-e-auto-das-sollte-man-ueber-die-elektroauto-batterie-wissen#gref>

- WAN21 Wannenwetsch, H. (2021) *Integrierte Materialwirtschaft, Logistik, Beschaffung und Produktion - Supply Chain im Zeitalter der Digitalisierung*, 6. Auflage. Springer-Verlag GmbH Deutschland, Mannheim.
DOI: 10.1007/978-3-662-61095-4
- WBG24 World Bank Group (2024) *Carbon Pricing Dashboard*. Zugriff am 27.02.2024 unter: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>
- WIE24a Wieler, J. (2024) *Elektro-Kleinwagen: Welche Modelle es gibt – und welche gut sind*. Zugriff am 07.02.2024 unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/kaufen/elektroautos-kleinwagen-marktuebersicht/>
- WIE24b Wieler, J. (2024) *Elektroautos im Test: So hoch ist die Reichweite wirklich*. Zugriff am 07.02.2024 unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/tests/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/>
- WIK21 Windisch-Kern, S. et. al. (2021) *Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Herausforderungen und aktuelle Forschungsergebnisse*. Berg- und Hüttenmaschine Monatshefte, Vol. 166 (3-3), S. 150-156:
DOI: 10.1007/s00501-021-01091-5
- WLX24 Wirtschaftslexikon24.com (2024) *Prognosetechnik*. Zugriff am 21.02.2024 unter: <https://www.wirtschaftslexikon24.com/d/prognosetechnik/prognosetechnik.html>
- WLZ22 Walz, J.-D. (2022) *Mit Digitalisierung Ressourcen schonen*. Zugriff am 09.01.2024 unter: <https://www.ipa.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/mit-digitalisierung-ressourcen-schonen.html>
- XIA23 Xiamen WinAck Battery Technology Co., Ltd. (2023) *Introduction of Wuling Hongguang MINI EV and its battery pack*. Zugriff am 07.02.2024 unter: <https://www.winackbattery.com/news/Wuling-Hongguang-MINI-EV-Battery-Pack.html>
- ZAC17 Zacharakis, Z. (2017) *Der Berg erwacht*. Zugriff am 16.02.2024 unter: <https://www.zeit.de/wirtschaft/2017-11/lithium-rohstoff-batterien-elektroautos-erzgebirge/seite-3#:~:text=%22Das%20Lithiumcarbonat%20aus%20der%20Atacama,pro%20Tonne%20doppelt%20so%20teuer>
- ZIM24 Zimmermann, R. (2024) *Kann Natrium bald teures Lithium in Akkus ersetzen?* Zugriff am 05.02.2024 unter: <https://www.br.de/nachrichten/bayern/kann-natrium-bald-teures-lithium-in-akkus-ersetzen,U0Zxoti>
- ZSW23 Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg und Statista (2023) *Datenservice Erneuerbare Energien*. Zugriff am 09.02.2024 unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/406683/umfrage/anzahl-der-verkaeufe-von-elektroautos-weltweit-prognose/#:~:text=Die%20Zahl%20der%20Neuzulassungen%20von,wie%20noch%20zwei%20Jahre%20zuvor> und <https://www.zsw-bw.de/mediathek/datenservice.html>

9 Anhang

A.3.1 – Berechnung des spezifischen Lithiumgewicht m_3 nach Kathoden-Marktanteil

kg Li pro kWh nach Kathoden-Marktanteil differenziert (DERA21, S.99 f.)									
Batterie-Kathodentyp (DERA21, S.100)	kg/kWh nach DERA21 S.99	Marktanteil 2020 [%]	Marktanteil 2025 [%]	Marktanteil 2030 [%]	Marktanteil 2035 [%]	2020 (gewichtet) [kg/kWh * Marktanteil in %]	2025 (gewichtet) [kg/kWh * Marktanteil in %]	2030 (gewichtet) [kg/kWh * Marktanteil in %]	2035 (gewichtet) [kg/kWh * Marktanteil in %]
LFP (Li-Eisen-Phosphat)	0,084	10%	10%	5%	4%	0,008	0,008	0,004	0,003
NCA5	0,095	10%	12%	12%	13%	0,010	0,011	0,011	0,012
NCA15	0,098	4%	1%	0%	0%	0,004	0,001	-	-
NMC811	0,096	5%	23%	45%	46%	0,005	0,022	0,043	0,044
NMC622	0,104	34%	37%	25%	22,5%	0,035	0,038	0,026	0,023
NMC532	0,121	10%	8%	2%	0,5%	0,012	0,010	0,002	0,001
NMC433	0,117	9%	7%	1%	0%	0,011	0,008	0,001	-
NMC111	0,12	18%	2%	0%	0%	0,022	0,002	-	-
HE-NMC	0,123	0%	0%	10%	14%	-	-	0,012	0,017
Summe		100%	100%	100%	100%	0,106	0,102	0,101	0,101
						Differenz/ Abweichung	0,005	Durchschnitt Gesamt	0,102 kg/kWh

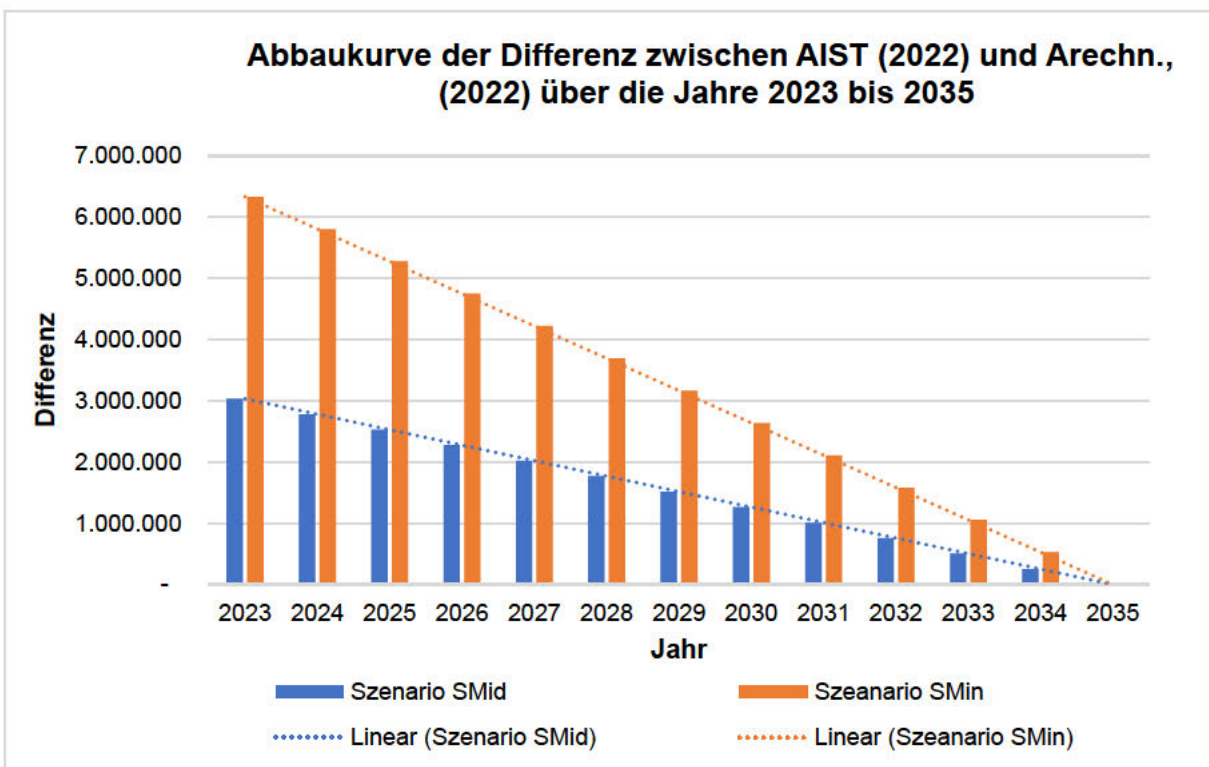
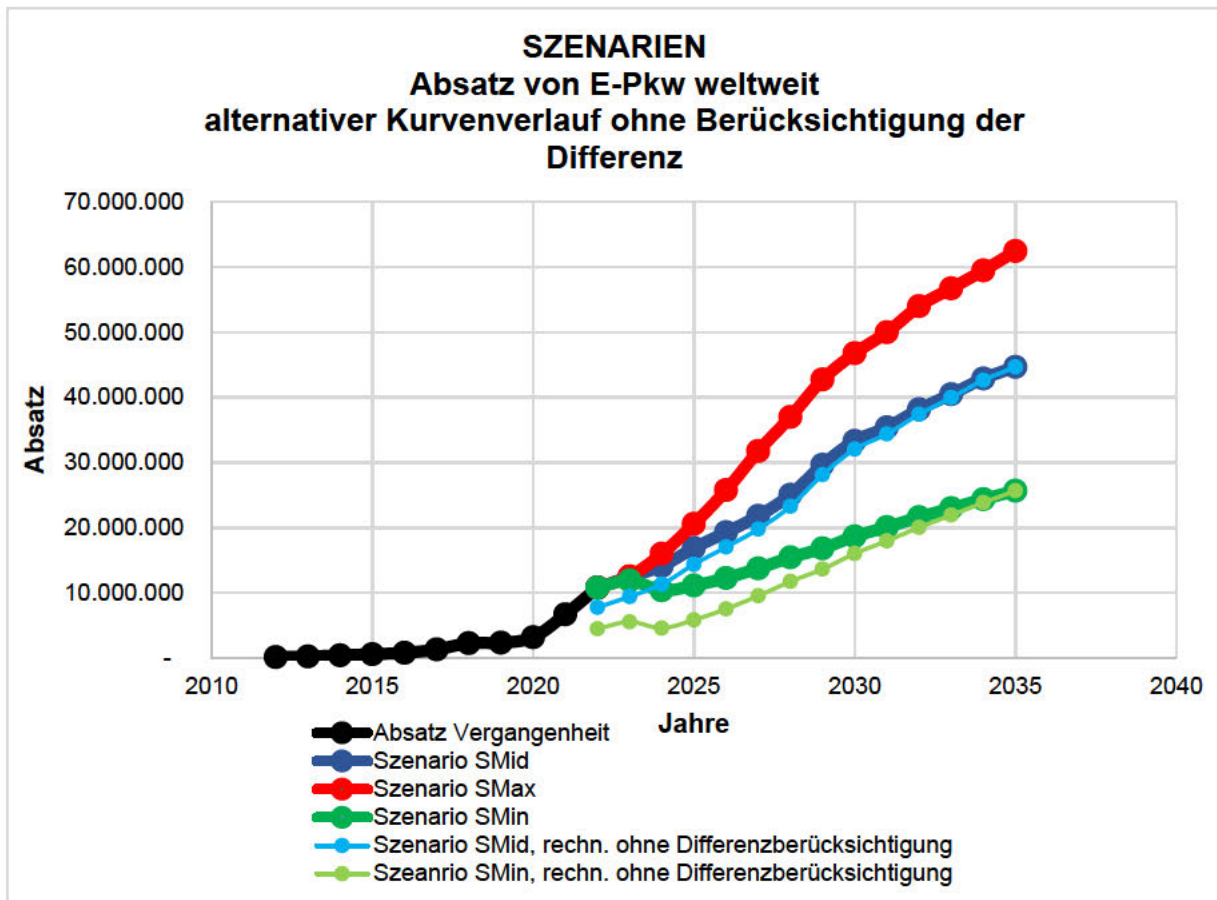
A.3.3 – Absatzprognosen A_V, A₁ – A₇

Absatz Vergangenheit (ZSW23)												
Jahr	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2022
Absatz	127.880	220.800	384.600	564.770	785.570	1.289.090	2.266.020	2.320.220	3.175.090	6.682.510	10.793.670	

Absatzprognosen A1 - A7															
Quelle	Jahr	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
A1 (DERA21)	A1, Mittelweg				16.110.000	20.000.000	23.000.000	28.000.000	32.000.000	34.370.000	37.000.000	38.500.000	40.000.000	42.000.000	43.470.000
	A1, Nachhaltig				20.640.000	28.000.000	36.000.000	43.000.000	50.000.000	54.040.000	56.000.000	56.000.000	54.000.000	52.500.000	66.910.000
	A1, Fossil				3.340.000	5.000.000	7.000.000	9.000.000	10.000.000	11.650.000	12.500.000	13.500.000	14.500.000	15.500.000	16.520.000
	E-Pkw	7,5	10	13	15,5	18,5	21,5	25	28	31	34,5	37,5	41	43,5	44
A2 (GTD23)	Summe	7.500.000	10.000.000	13.000.000	15.500.000	18.500.000	21.500.000	25.000.000	28.000.000	31.000.000	34.500.000	37.500.000	41.000.000	43.500.000	44.000.000
A3 (GMS23)	Europa	1.200.000	1.500.000	2.400.000	3.400.000					11.900.000					16.000.000
	China	4.100.000	5.500.000	6.300.000	6.900.000					8.900.000					11.900.000
	USA	800.000	1.200.000	2.100.000	3.400.000					8.000.000					11.200.000
	Indien	-	100.000	100.000	200.000					1.300.000					1.900.000
	Japan	100.000	100.000	100.000	300.000					900.000					2.100.000
A4 (DEL20)	SUMME	6.200.000	8.400.000	11.000.000	14.200.000	18.000.000	21.500.000	25.000.000	28.000.000	31.000.000	34.000.000	36.500.000	38.500.000	41.000.000	43.100.000
A5 (STA23a)	Jahr	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030					
	Summe	7.600.000	9.500.000	11.500.000	13.000.000	15.000.000	17.500.000	22.500.000	28.000.000	36.000.000					
	BEV	7,5	7,7	8,7	9,5	10,8	12,1	13,4							
	PHEV	2,8	2,9	3,1	3,4	3,3	3,3	3,6							
A6 (ABB21)	Summe	10,3	10,6	11,8	12,9	14,1	15,4	17							
	SUMME	10.300.000	10.600.000	11.800.000	12.900.000	14.100.000	15.400.000	17.000.000							
	Summe	4.463.000	5.533.000	4.574.288	8.323.000	10.044.000	12.055.000	14.470.000	17.277.000	20.399.000	23.441.000	26.538.000	29.354.000	32.179.000	34.785.000
	BEV	2.926.000	3.658.000	4.572.000	5.532.000	6.639.000	7.900.000	9.401.000	11.093.000	12.979.000	15.056.000	17.314.000	19.392.000	21.719.000	24.325.000
A7 (BLO22)	PHEV	1.537.000	1.875.000	2.288	2.791.000	3.405.000	4.155.000	5.069.000	6.184.000	7.420.000	8.385.000	9.224.000	9.962.000	10.460.000	10.460.000
	Summe	10.500.000	12.500.000	16.000.000	20.500.000	23.500.000	27.500.000	31.000.000	35.500.000	39.500.000	43.000.000	48.000.000	51.000.000	54.500.000	58.000.000

Hinweis: Die rot hinterlegten Zellen sind grafisch abgelesene Zwischenwerte, die nachfolgend für die Ableitung der Szenarien benötigt werden

A.3.5 – Abbaukurve der Differenz zwischen der Berechnung und der IST-Werte



A.3.6 – Prognose des Lithiumbedarfs

Bedarfsprognose															
	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Szenario SMid															
Absatz		10.793.670	12.455.337	14.092.787	16.889.499	19.295.449	21.801.399	25.050.778	29.646.085	33.308.654	35.399.257	38.165.893	40.476.328	42.888.564	44.671.000
Lithiumgewicht Mnetto [kg]		6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84
Ausschuss 15%		1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124
Summe Bedarf		82.983.462	95.758.621	108.347.603	129.849.169	148.346.499	167.612.644	192.594.387	227.923.845	256.082.263	272.155.149	293.425.488	311.188.488	329.734.143	343.437.795
Szenario SMin															
Absatz		10.793.670	11.863.670	10.377.402	11.107.058	12.270.003	13.747.947	15.427.891	16.803.835	18.662.279	20.080.723	21.601.668	22.982.112	24.367.056	25.652.500
Lithiumgewicht Mnetto [kg]		4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04
Ausschuss 6%		1.064	1.064	1.064	1.064	1.064	1.064	1.064	1.064	1.064	1.064	1.064	1.064	1.064	1.064
Summe Bedarf		46.397.238	50.996.697	44.607.886	47.744.357	52.743.342	59.096.374	66.317.714	72.232.293	80.220.927	86.318.194	92.856.064	98.789.986	104.743.252	110.268.810
Szenario SMax															
Absatz		10.793.670	12.500.000	16.000.000	20.570.000	25.750.000	31.750.000	37.000.000	42.750.000	46.770.000	50.000.000	54.000.000	56.750.000	59.500.000	62.455.000
Lithiumgewicht Mnetto [kg]		10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23
Ausschuss 16 %		1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191
Summe Bedarf		131.509.320	152.299.125	194.942.880	250.623.440	313.756.198	386.839.778	450.805.410	520.863.008	569.842.406	609.196.500	657.932.220	691.438.028	724.943.835	760.947.348

Global Lithium (GLI24)															
	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
kt LCE]	321	460	620	790	1040	1290	1500	1690	1890	2150	2340	2560			
EV [kg LCE]	460.000.000	620.000.000	790.000.000	990.000.000	1.290.000.000	1.590.000.000	1.890.000.000	2.150.000.000	2.340.000.000	2.560.000.000	2.810.000.000	3.060.000.000	3.290.000.000	3.500.000.000	3.690.000.000
EV [kg] (-5,3)	86.792.453	116.981.132	149.056.604	196.226.415	243.396.226	283.018.868	318.867.925	356.603.774	405.660.377	441.509.434	483.018.868				

Extrapolation			Differenz dy	Steigung dy/dx
2033	2034	2035		
521.423.671	559.828.473	598.233.276	422.452.830	38.404.803

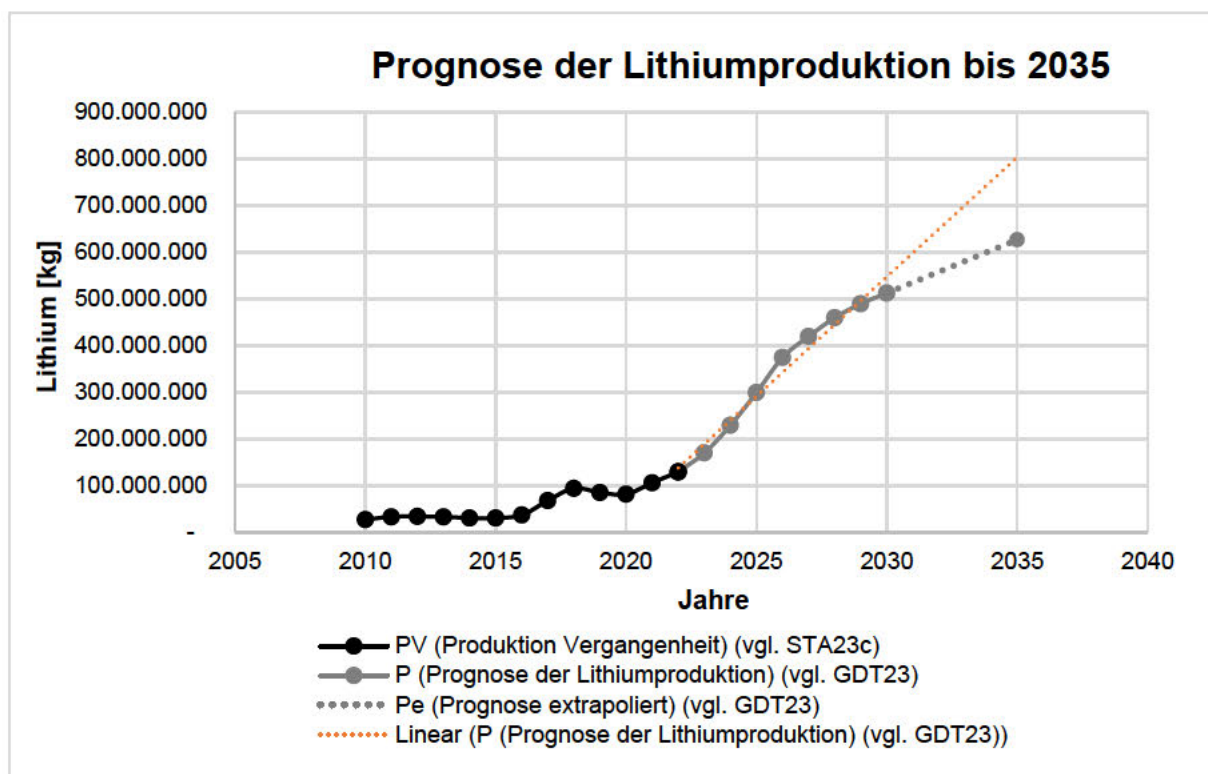
A.4.1 – Lithiumressourcen, -reserven und -produktion weltweit

Lithiumvorkommen (USGS23, S.99)				USGS23 S.2		
Staat	Ressourcen [t] (Stand 2020)	Reserven (Stand 2020)	Minen- produktion 2019	Ressourcen [t] (Stand 2023)	Reserven (Stand 2023)	Minen- produktion 2022
Weltweit	80.000.000	17.000.000	77.000	98.000.000	26.000.000	130.000
Bolivien	21.000.000			21.000.000		
Argentinien	17.000.000	1.700.000	6.400	20.000.000	2.700.000	6.200
Chile	9.000.000	8.600.000	18.000	11.000.000	9.300.000	39.000
USA	6.800.000	630.000	k.a.	12.000.000	1.000.000	
Australien	6.300.000	2.800.000	42.000	7.900.000	6.200.000	61.000
China	4.500.000	1.000.000	7.500	6.800.000	2.000.000	19.000
Kongo	3.000.000			3.000.000		
Deutschland	2.500.000			3.200.000		
Canada	1.700.000	370.000	200	2.900.000	930.000	500
Mexico	1.700.000			1.700.000		
Tschechien	1.300.000			1.300.000		
Mali	1.000.000			840.000		
Russland	1.000.000			1.000.000		
Serbien	1.000.000			1.200.000		
Zimbabwe	540.000	230.000	1.600	690.000	310.000	800
Brasilien	400.000	95.000	300	730.000	250.000	2.200
Spanien	300.000			320.000		
Portugal	250.000	60.000	1.200	270.000	60.000	600
Peru	130.000			880.000		
Österreich	50.000			60.000		
Finnland	50.000			68.000		
Kasachstan	50.000			50.000		
Namibia	9.000		k.a.	230.000		
Ghana	-			180.000		
Restliche Länder		1.100.000	-		3.300.000	-
REST rechn.	421.000			682.000		
Summe	79.579.000	16.585.000	77.200	97.318.000	26.050.000	129.300

TOP 5 Länder mit Lithiumreserven				
Ranking	Land	Ressource	Reserve	Anteil Verfügbarkeit
1	Chile	11.000.000.000	9.300.000.000	84,5%
2	Australien	7.900.000.000	6.200.000.000	78,5%
3	Argentinien	20.000.000.000	2.700.000.000	13,5%
4	China	6.800.000.000	2.000.000.000	29,4%
5	USA	12.000.000.000	1.000.000.000	8,3%
Gesamt		98.000.000.000	26.000.000.000	26,5%
Anteil TOP 5		58,9%	81,5%	

TOP 3 Produzenten						
Land	Ressource	Reserve	Produktion	Anteil an Reserven	Reserven für X Jahre	Schätzung Produktion 2023 (STA24)
Australien	7.900.000.000	6.200.000.000	61.000.000	0,98%	101,6	86.000.000
Chile	11.000.000.000	9.300.000.000	39.000.000	0,42%	238,5	44.000.000
China	6.800.000.000	2.000.000.000	19.000.000	0,95%	105,3	33.000.000

A.4.2 – Alternative Extrapolation bei durchschnittlicher Steigung



A.4.3 – Produktionsprognose und Extrapolation

Produktionsprognose (GDT23b)									
Jahr	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Lithium Produktion in 1000 t	130,4	170,8	230	300	375	420	460	490	512,8
	130.400.000	170.800.000	230.000.000	300.000.000	375.000.000	420.000.000	460.000.000	490.000.000	512.800.000

Extrapolation					
Jahr	2031	2032	2033	2034	2035
Lithium Produktion in 1000 t					
	300.000	558.400.000	581.200.000	604.000.000	626.800.000

A.4.4 – Recyclingpotenziale

Recyclingpotenzial Szenario SMid														
Jahr	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Absatz t-10 Jahre aus Vergangenheit und Prognose	127.880	220.800	384.600	564.770	785.570	1.289.090	2.266.020	2.320.220	3.175.090	6.682.510	10.793.670	12.455.337	14.092.787	16.889.499
Lithiummasse MNetto (Ausschuss wird nicht berücksichtigt)	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84	6,84
E-Pkw Verlust 10% (vgl. DERA23)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Recyclingverlust 10%	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Recyclingpotenzial Altbatterien	708.506	1.223.320	2.130.838	3.129.052	4.352.372	7.142.074	12.554.657	12.854.947	17.591.269	37.023.778	59.801.249	69.007.547	78.079.678	93.574.579
Jährlicher Lithiumbedarf	82.983.462	95.758.621	108.347.603	129.849.169	148.346.499	167.612.644	192.594.387	227.923.845	256.082.263	272.155.149	293.425.488	311.188.488	329.734.143	343.437.795
Ausschuss 11% (vgl. DERA23)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Recyclingverlust 10%	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Recyclingpotenzial Ausschuss	8.215.363	9.480.103	10.726.413	12.855.068	14.686.303	16.593.652	19.066.844	22.564.461	25.352.144	26.943.360	29.049.123	30.807.660	32.643.680	34.000.342
Potenzial Gesamt	8.923.869	10.703.424	12.857.250	15.984.119	19.038.675	23.735.726	31.621.502	35.419.408	42.943.413	63.967.138	88.850.373	99.815.208	110.723.358	127.574.921
Summe Primär und Sekundär	139.323.869	181.503.424	242.857.250	315.984.119	394.038.675	443.735.726	491.621.502	525.419.408	555.743.413	599.567.138	647.250.373	681.015.208	714.723.358	754.374.921

Recyclingpotenzial Szenario SMin														
Absatz t-10 Jahre aus Vergangenheit und Prognose	127.880	220.800	384.600	564.770	785.570	1.289.090	2.266.020	2.320.220	3.175.090	6.682.510	10.793.670	11.863.670	10.377.402	11.107.058
Lithiummasse MNetto (Ausschuss wird nicht berücksichtigt)	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04
E-Pkw Verlust 10%	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Recyclingverlust 10% (vgl. DERA23)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Recyclingpotenzial jährlicher Lithiumbedarf	418.475	722.546	1.258.565	1.848.153	2.570.699	4.218.418	7.415.324	7.592.688	10.390.165	21.867.846	35.321.206	38.822.674	33.959.011	36.346.738
Ausschuss 6%	46.397.238	50.996.697	44.607.886	47.744.357	52.743.342	59.096.374	66.317.714	72.232.293	80.220.927	86.318.194	97.856.064	98.789.986	104.743.252	110.268.810
Recyclingverlust 10%	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Recyclingverlust 10% (vgl. DERA23)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Recyclingpotenzial Ausschuss	2.505.451	2.753.822	2.408.826	2.578.195	2.848.140	3.191.204	3.581.157	3.900.544	4.331.930	4.661.182	5.014.227	5.334.659	5.656.136	5.954.516
Potenzial Gesamt	2.923.925	3.476.368	3.667.391	4.426.349	5.418.840	7.409.622	10.996.480	11.493.232	14.722.095	26.529.028	40.335.433	44.157.333	39.615.146	42.301.253
Summe Primär und Sekundär	133.323.925	174.276.368	233.667.391	304.426.349	380.418.840	427.409.622	470.996.480	501.493.232	527.522.095	562.129.028	598.735.433	625.357.333	643.615.146	669.101.253

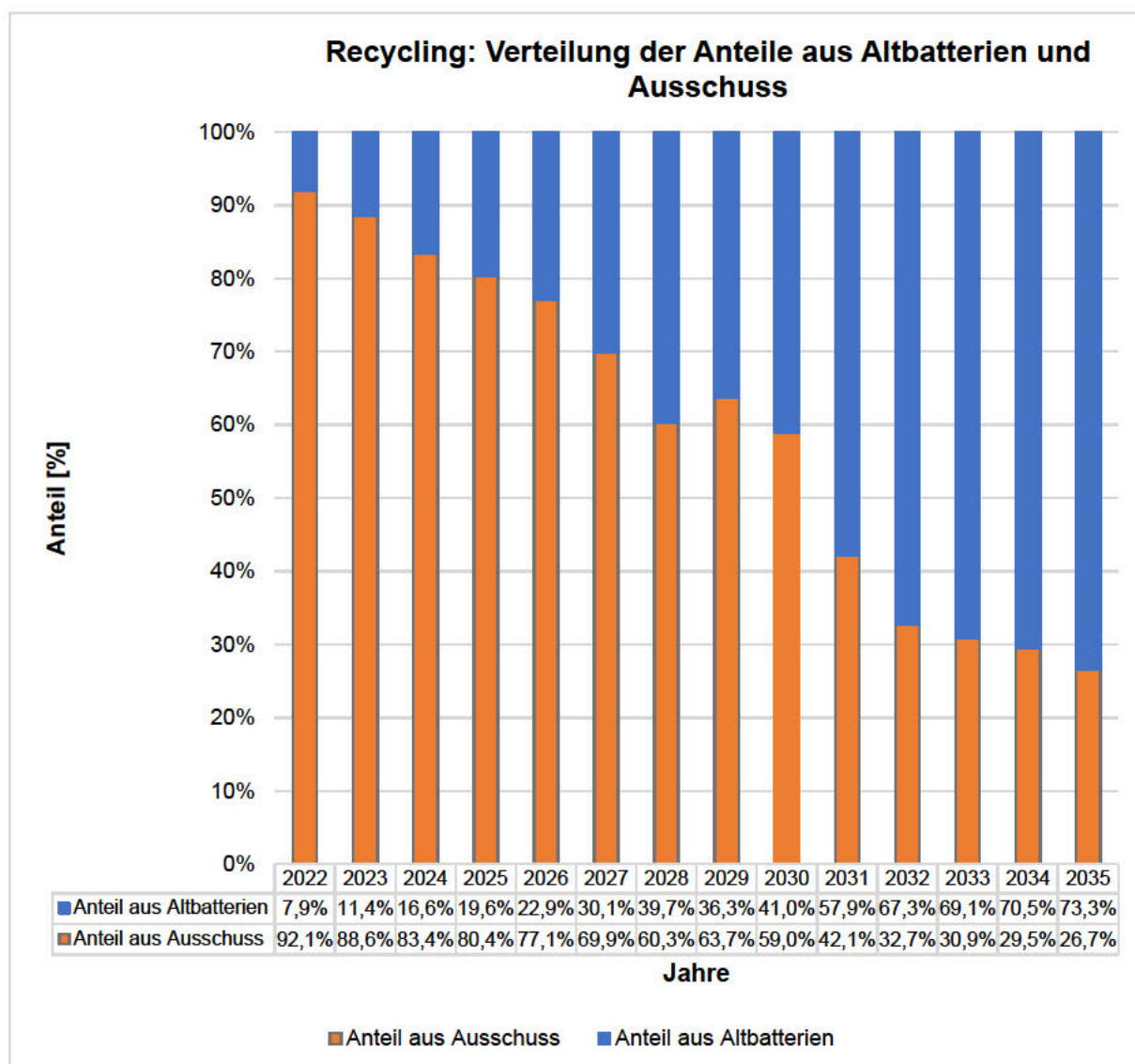
Recyclingpotenzial Szenario SMax														
Absatz t-10 Jahre aus Vergangenheit und Prognose	127.880	220.800	384.600	564.770	785.570	1.289.090	2.266.020	2.320.220	3.175.090	6.682.510	10.793.670	12.500.000	16.000.000	20.570.000
Lithiummasse MNetto (Ausschuss wird nicht berücksichtigt)	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23
E-Prw Verlust 10%	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Recyclingverlust 10% (vgl. DERA23)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Recyclingpotenzial Altbatterien	1.059.652	1.829.615	3.186.911	4.679.854	6.509.469	10.681.786	18.776.922	19.226.059	26.306.748	55.373.283	89.439.588	103.578.750	132.580.800	170.449.191
Jährlicher Lithiumbedarf	131.509.320	151.754.950	194.942.880	250.623.440	313.736.198	386.839.778	450.805.410	520.863.008	569.842.406	603.104.535	633.564.360	639.656.325	651.840.255	665.163.382
Ausschuss 16%	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Recyclingverlust 10% (vgl. DERA23)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Recyclingpotenzial Ausschuss	18.937.342	21.852.713	28.071.775	36.089.775	45.178.012	55.704.928	64.915.979	75.004.273	82.057.306	86.847.053	91.233.268	92.110.511	93.864.997	95.783.527
Potenzial Gesamt	19.996.994	23.682.328	31.258.686	40.769.629	51.687.481	66.386.714	83.692.901	94.230.312	108.367.055	142.220.336	180.672.856	195.689.261	226.445.797	266.232.718
Summe Primär- und Sekundär	150.396.994	194.482.328	261.258.686	340.769.629	426.687.481	486.386.714	543.692.901	584.230.312	621.167.055	677.820.336	739.072.856	776.889.261	830.445.797	893.032.718
Differenz Mid-SMid	5.999.944	7.227.056	9.189.860	11.557.771	13.619.836	16.326.104	20.625.021	23.926.176	28.221.318	37.438.110	48.514.939	55.657.875	71.108.212	85.273.667
Differenz SMax-SMid	11.073.125	12.978.904	18.401.435	24.785.510	32.648.806	42.650.988	52.071.399	58.810.905	65.423.642	78.253.197	91.822.483	95.874.053	115.722.438	138.657.797
Ausschussanteil Altbatterienanteil	92,1%	88,6%	83,4%	80,4%	77,1%	69,9%	60,3%	63,7%	59,0%	42,1%	32,7%	30,9%	29,5%	26,7%
	7,9%	11,4%	16,6%	19,6%	22,9%	30,1%	39,7%	36,3%	41,0%	57,9%	67,3%	69,1%	70,5%	73,3%
Anteil Primärproduktion	93,6%	94,1%	94,7%	94,9%	95,2%	94,7%	93,6%	93,3%	92,3%	83,1%	83,1%	83,1%	83,1%	83,1%
Anteil Sekundärproduktion	6,4%	5,9%	5,3%	5,1%	4,8%	5,3%	6,4%	6,7%	7,7%	16,9%	16,9%	16,9%	16,9%	16,9%

A.4.5 – Vergleichsprognose Recycling

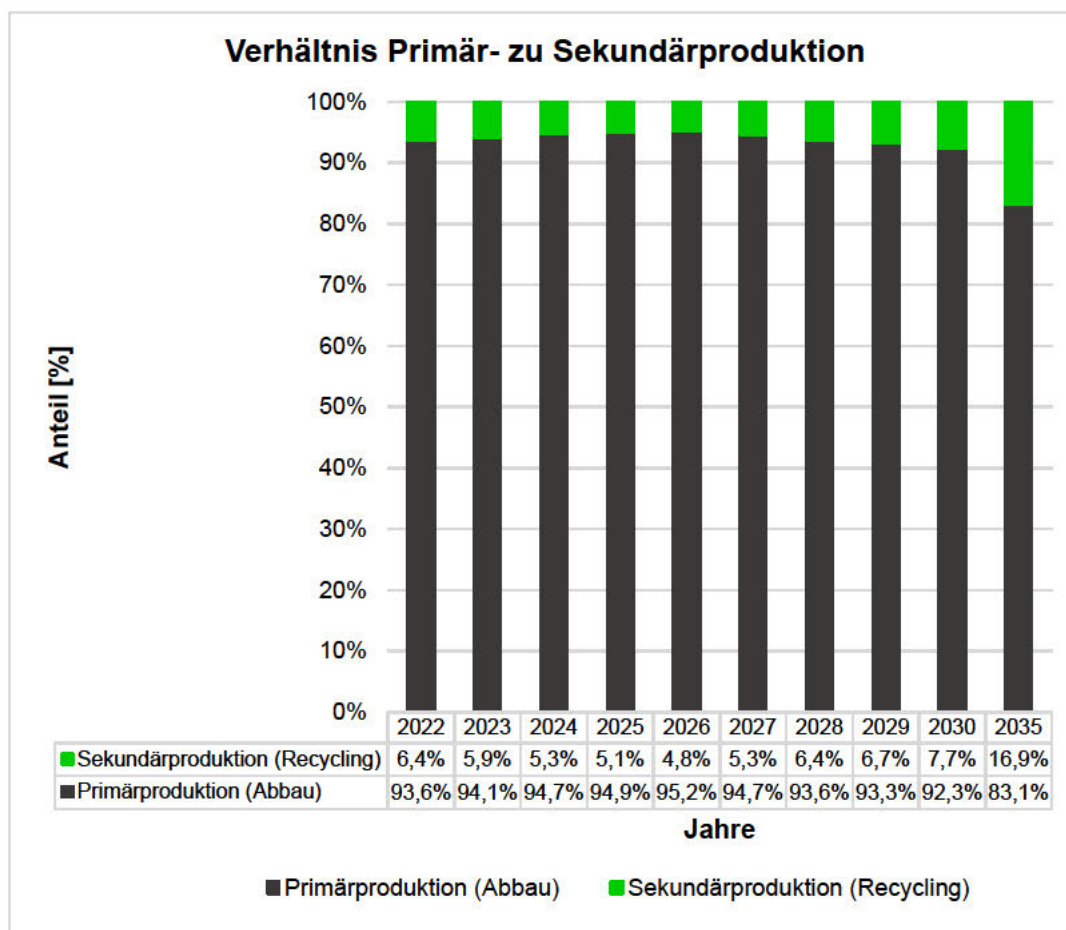
Vergleichsprognose (vgl. FAS23)												
Jahr	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Lithium Recycling [LCE]		58.000.000	68.000.000	84.000.000	99.000.000	112.000.000	127.000.000	143.000.000	161.000.000	183.000.000	207.000.000	239.000.000
Lithium Recycling [kg]		10.943.396	12.830.189	15.849.057	18.679.245	21.132.075	23.962.264	26.981.132	30.377.358	34.528.302	39.056.604	45.094.340

Extrapolation				
Jahr	2034	2035	Differenz	Steigung
Lithium Recycling [LCE]				
Lithium Recycling [kg]	48.198.971	51.303.602	34.150.943	3.104.631

A.4.6 – Balkendiagramm Recyclinganteile



A.4.7 – Balkendiagramm Primär- und Sekundäranteile



A.5.1 – Prognose Gesamtbedarf

Global Lithium (GLI24)												
Gesamt [1.000 kt LCE]	510	670	860	1.060	1.370	1.660	1.930	2.150	2.390	2.720	2.970	3.240
Gesamt [kg LCE]	510.000.000	670.000.000	860.000.000	1.060.000.000	1.370.000.000	1.660.000.000	1.930.000.000	2.150.000.000	2.390.000.000	2.720.000.000	2.970.000.000	3.240.000.000
Gesamt [kg] (:5,3)	96.226.415	126.415.094	162.264.151	200.000.000	258.490.566	313.207.547	364.150.943	405.660.377	450.943.396	513.207.547	560.377.358	611.320.755
Anteil EV/Gesamt	62,9%	68,7%	72,1%	74,5%	75,9%	77,7%	77,7%	78,6%	79,1%	79,0%	78,8%	79,0%

Extrapolation	Differenz dy	Steigung dy/dx
658.147.513	704.974.271	751.801.029
79,2%	79,4%	79,6%
		46.826.758