

# Herausforderungen bei der Rohstoffversorgung Deutschlands

Zur Erlangung des akademischen Grades einer

Doktorin der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

von der KIT-Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

M. Sc. Katharina Julia Steiger

aus Achern

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Mai 2023

Erster Gutachter:

Prof. Dr. Christoph Hilgers

Zweiter Gutachter:

Prof. Dr. Jochen Kolb

Dritter Gutachter:

Prof. Dr. Frank Schultmann



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

This document is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>

## Danksagung

Zunächst möchte ich meinem Betreuer, Professor Dr. Christoph Hilgers, für sein Vertrauen und seine Unterstützung danken. Er übertrug mir die volle Verantwortung für meine Aufgaben, gab mir nötige Denkanstöße und ausreichend Freiraum, um diese Arbeit nach meinem besten Wissen und Gewissen anzufertigen. Durch die Themenvorschläge ermöglichte er es mir, mich mit hochaktuellen Rohstofffragestellungen intensiv auseinanderzusetzen und interdisziplinäre Zusammenhänge zu durchdringen. An dieser Stelle möchte ich mich auch für die Möglichkeit bedanken, an verschiedenen Konferenzen teilnehmen zu können.

Mein Dank geht auch an Professor Dr. Jochen Kolb als meinen Zweitgutachter und Co-Autor. Mit seinem großen Interesse an den interdisziplinären Themen gab auch er mir in Diskussionen wichtige Denkanstöße zur Verbesserung des Gesamtergebnisses. Ich möchte ihm und seiner Forschungsgruppe auch für die gemeinsame Arbeit am Lithium Dossier für den ThinkTank für Industrielle Ressourcenstrategien danken. Herrn Professor Dr. Frank Schultmann danke ich für die Übernahme der Rolle des dritten Gutachters.

Bedanken möchte ich mich ebenso bei allen Kolleginnen und Kollegen der Professur für Strukturgeologie, welche die außergewöhnliche Zeit während der COVID-19-Pandemie angenehm gestaltet haben. Sie waren stets für einen guten fachlichen Austausch offen.

Von Herzen danke ich meinen Freunden und meiner Familie, vor allem für viel Verständnis, unvergesslich schöne Gesten und wunderbare Gespräche. Danke an Dr. Paul Baumeister und Celia Baumeister für diverse spontane Unterhaltungen. Danke an Dr. Christina Schmidt und Franziska Wübbeler für den Erfahrungsaustausch. Danke an Vinzent und Tanja Bech für die Einrahmung des Artikels „Ohne China geht da gar nichts“ aus der Süddeutschen Zeitung. Danke an die Aachener Clique für den leckersten Promotionskuchen zur erfolgreich absolvierten Promotion. Ebenso herzlichen Dank an meine Femtec-Zonta Mentorin Pamela Stenzel, welche kein besseres Vorbild für Authentizität sein könnte. Außerdem danke ich meinem Partner Felix Allgaier besonders für seinen erdenden und liebevollen Beistand in jeglicher Lebenslage.

## Kurzfassung

Für den Aufbau eines Lebensstandards, wie ihn die Gesellschaft in Deutschland hat, benötigt es seit jeher den Einsatz mineralischer Rohstoffe wie auch Energierohstoffe. Um den hoch entwickelten Status zu halten sowie Klima-, Energie- und Industrieziele zu erreichen und damit global konkurrenzfähig zu bleiben, werden auch weiterhin Rohstoffe benötigt. Die Technologien, mit denen die anstehenden Veränderungen im Industrie- und Verkehrssektor realisiert werden sollen, bedingen den Einsatz von potenziell kritischen Rohstoffen, darunter auch den der Metalle Lithium, Iridium, Scandium und die Seltene Erden Elemente.

Mit Steine- und Erden-Rohstoffen kann sich Deutschland aus heimischen Lagerstätten selbst versorgen. Bei Kohlenwasserstoffen als Energieträger und Rohstoff, Industriemineralen, metallischen Rohstoffen sowie Halberzeugnissen ist die deutsche Industrie weitestgehend auf Importe vom internationalen Markt angewiesen. Die Kreislaufwirtschaft kann bei Stahl, Aluminium, Kupfer und Zink zur Bedarfsdeckung in Deutschland beitragen. Ansonsten ist das Recycling für die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen, wo technisch, ökonomisch und ökologisch möglich, noch nachhaltig auszubauen.

Um mögliche Herausforderungen bei der gegenwärtigen und zukünftigen Rohstoffversorgung Deutschlands im Jahr 2030 aufzudecken, werden Experteninterviews durchgeführt sowie praxisnahe Fallbeispiele mit Szenarioanalysen für den Bedarf an Lithium, Iridium, Scandium und den Seltene Erden Elementen: Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium konzipiert und gerechnet. In diesem Zusammenhang werden die unterschiedlichen Rohstoffwertschöpfungsketten und die Stellung Deutschlands im internationalen Kontext näher betrachtet.

Die Durchführung und Auswertung von Experteninterviews mit 34 Experten aus Unternehmen der Exploration und Produktion sowie der Rohstoffverarbeitung, aus Industrie- und Naturschutzverbänden, Wissenschaft, Landesbergbehörden und Ministerien geben Aufschluss über die Lage der Rohstoffversorgung in Deutschland im Jahr 2021. Zu dieser Zeit ist das Stimmungsbild bereits von der COVID-19-Pandemie geprägt. Die Experten benennen 28 Herausforderungen, welche sie bei der Ausübung ihrer Tätigkeiten aktiv beeinflussen. Als große Hürden werden vor allem die fehlende Akzeptanz für inländische Rohstoffprojekte sowie die geringere Konkurrenzfähigkeit Deutschlands bei der globalen Rohstoffbeschaffung wahrgenommen. Auch die Dauer der Genehmigungsverfahren für Rohstoffförderprojekte, der Fachkräftemangel und die Interessenskonflikte verschiedener Akteure werden von den Experten als besonders hinderlich erachtet. Die Lage für die heimische Förderung wird als eher pessimistisch und die Bergbaubranche als Auslaufmodell eingeschätzt.

Die Experten äußern sich auch zur Rolle des Staates und definieren notwendige Randbedingungen, wie beispielsweise mehr staatliche Unterstützung bei der heimischen Rohstoffförderung, bei Auslandstätigkeiten von deutschen Unternehmen oder eine stärkere Einbindung des Themas in die Außen- wie Innenpolitik, die Deutschland bei der Rohstoffversorgung konkurrenz- und zukunftsfähiger aufstellen sollen. Das vorhandene Fachwissen sowie technische Innovationen

werden als Maßnahmen zur Weiterentwicklung und Erhalt verschiedener Branchen und folglich als Basis einer resilienten Rohstoffversorgung für die deutsche Industrie gesehen.

Das erste Fallbeispiel behandelt Lithium. Das leichteste Metall des Periodensystems wird in der Kathode von Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) verbaut. LIBs stellen aktuell den führenden Energiespeicher für Elektrofahrzeuge mit Batterie (BEV) dar. Bis zum Jahr 2030 sollen in Deutschland über zehn Batteriezellenproduktionsstandorte entstehen, europaweit über 30. Die Elektrodenmetalle (Lithium, Nickel, Kobalt, Mangan, Aluminium) müssen derzeit vom Weltmarkt zugekauft werden. Die durchgeführte Szenarioanalyse ergibt, dass die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 zwischen 60,4 kt LCE (Lithiumkarbonatäquivalent) und 173,2 kt LCE benötigen wird.

Um den Bedarf an Lithium auch heimisch bzw. durch europäische Ressourcen decken zu können, wird die Gewinnung von Lithium aus Lagerstätten der EU-27 in verschiedenen Projekten angestrebt. Stand Mai 2022 existieren sieben Projekte in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium, die eine industrielle Förderung von Lithium aus konventionellen, magmatischen oder sedimentären Lagerstätten sowie aus unkonventionellen Lagerstätten, geothermalen Solen, je nach Projekt ab 2024, 2025 oder 2026 vorsehen. Die Verfügbarkeit des Primärlithiums aus den sieben EU-27 Projekten wird mit maximal ca. 39,4 kt LCE/a ermittelt. Eine Bereitstellung von Sekundärlithium wird mit maximal ca. 6,9 kt LCE/a kalkuliert. Dementsprechend bleiben je nach Szenario zwischen 47,5 kt LCE/a und 173,2 kt LCE/a, die im Jahr 2030 über Lieferketten aus dem außereuropäischen Ausland zu decken wären, was je nach Preisannahme ein monetäres Volumen zwischen 1,2 und 11,5 Mrd. US\$ darstellen würde. Werden bestehende Abnahmeverträge der Lithiumprojekte in der EU-27 miteingerechnet und eine Reduktion des Lithiumverbrauchs in den Kathoden sowie Effizienzsteigerungen im Recycling angenommen, könnte das Primär- und Sekundärlithium aus der EU-27 den Bedarf an Lithium für die Elektroden für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 zu maximal 34,5 % decken. Es resultiert eine bestehende Importabhängigkeit für das Kathodenmetall Lithium für Deutschland.

Weitere innovative Fördermethoden und Aufbereitungstechnologien, wie beispielsweise die Lithiumgewinnung aus Grubenwasser ehemaliger Bergwerke oder Produktionswässern aus Erdgas- oder Erdölförderungen, an denen jüngst geforscht wird, könnten bei technischer und wirtschaftlicher Realisation das Angebot an europäischem Lithium erhöhen. Unabdingbar sind ebenso die Weiterentwicklung und der Ausbau der Recyclingmöglichkeiten innerhalb Europas. Die Mengen an Primär- und Sekundärlithium werden jedoch unzureichend für den Bedarf im Jahr 2030 bleiben. Die hinzukommende mangelnde Infrastruktur für die Lithiumraffination und hohe Energiekosten werden keine autarke Produktion von Lithium-Ionen-Batteriezellen im Jahr 2030 in Europa zulassen. Wenn Europa nicht in alle Prozessschritte der Wertschöpfungskette investiert, wird es weiterhin von asiatischen, insbesondere von chinesischen Produzenten abhängig sein.

Im zweiten und dritten Fallbeispiel wird der Bedarf ausgewählter, potenziell kritischer Rohstoffe ermittelt, welche für die Erzeugung von Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland notwendig sind. Der Wirtschaftszweig „Erzeugung und erste Bearbeitung von Eisen und Stahl“ (WZ 24 1-3) ist der zweitgrößte Treibhausgas-Emittent der

deutschen Industrie. Um die (Kohlenstoffdioxid-)Emissionen in der Stahlherstellung zu minimieren, wird der Einsatz von Wasserstoff in Pilotprojekten erprobt. Um Wasserstoff grün zu erzeugen, benötigt es Elektrolyseure, die mit Strom aus Erneuerbaren Energien gespeist werden. Im gewählten Fallbeispiel geschieht dies mit Energie aus Windkraftanlagen (WKAs). Der Bau eines Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyseurs (PEM) bedingt den Einsatz von Iridium, der eines Festoxid-Elektrolyseurs (SO) den von Scandium. In WKAs werden die Seltene Erden Elemente Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium in Permanentmagneten eingesetzt.

Für die Erzeugung von Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland werden zwischen 4,2 GW und 5,6 GW Elektrolysekapazitäten benötigt. Bei einem Marktanteil von 45 % der PEM-Elektrolyse (PEMEL) in Deutschland bedarf es zwischen 2,8 % (0,2 t) und 4,3 % (0,3 t) der globalen Iridiumförderung aus dem Jahr 2018 für die einmalige Errichtung der Anlagen mit einer Lebensdauer von ca. 20 Jahren. Sollte die SO-Elektrolyse (SOEL) 10 % der Marktanteile einnehmen, wird sich der Scandiumbedarf für den Bau der Anlagen im Fallbeispiel zwischen 0,2 % (0,02 t) und 0,6 % (0,05 t) der globalen Förderung aus dem gleichen Jahr bewegen. Um die nötige Energie von ca. 36,5 TWh für die Wasserelektrolyse zu generieren, benötigt es eine installierte Leistung zwischen 15,3 GW und 20,9 GW Onshore sowie 2,2 GW und 3,0 GW Offshore. Für die Errichtung der Anlagen werden zwischen 821,5 t und 1050,2 t an Neodym, zwischen 168,2 t und 215,8 t an Praseodym, zwischen 174,8 t und 231,7 t an Dysprosium und zwischen 30,6 t und 39,0 t an Terbium notwendig sein.

Wenn keine neuen Lagerstätten mit der Gewinnung von Iridium als Beiprodukt (z. B. Nickel-Kupfer-Lagerstätten) entwickelt werden und sich die Marktaufteilung der Elektrolyseurtechnologien nicht stärker hin zu Alternativen mit einem geringeren oder keinem Verbrauch an potenziell kritischen Rohstoffen entwickelt, kann die Verfügbarkeit von Iridium für Deutschland kritisch werden. Aufgrund der globalen hohen Nachfrage nach Seltene Erden Elementen und der Monopolstellung Chinas in der Raffination kann für die Verfügbarkeit dieser für Deutschland die europäische Förderung beispielsweise in Schweden oder Grönland und der Aufbau einer europäischen Raffination entscheidend sein.

Zur Reduktion der Abhängigkeit von Rohstoffimporten und Importen von Halberzeugnissen in Deutschland sind die Entdeckung neuer Lagerstätten und der Zugang zu diesen durch unabhängige Unternehmen, der Aufbau bzw. die Beibehaltung einer Verhüttungs- und Raffinationsinfrastruktur in Europa, Materialeffizienzsteigerungen, die Förderung von nachhaltigen Technologien und die Etablierung einer europäischen Recyclingwertschöpfungskette unabdingbar.

## Abstract

To build a standard of living like the one the society in Germany has, it has always required the use of mineral raw materials as well as energy raw materials. In order to maintain the highly developed status, to achieve climate, energy and industrial goals and thus to remain globally competitive, raw materials will continue to be needed. The technologies to realize the upcoming changes in the industrial and transportation sectors require the use of potentially critical raw materials, including lithium, iridium, scandium, and the rare earth elements.

In terms of stone and earth raw materials, Germany can supply itself from domestic deposits. In the case of hydrocarbons as an energy source and a raw material, industrial minerals, metallic raw materials and semi-finished products, German industry is largely dependent on imports from the international market. The circular economy can contribute to meeting demand in Germany for steel, aluminum, copper, and zinc; otherwise, recycling for the provision of secondary raw materials must still be sustainably expanded where technically, economically, and ecologically possible.

To uncover possible challenges in the current and future supply (in the year 2030) of raw materials in Germany, expert interviews will be conducted as well as practical case studies with scenario analyses will be designed and calculated to investigate the demand for lithium, iridium, scandium, and the rare earth elements: Neodymium, Praseodymium, Dysprosium and Terbium. Different raw material value chains and the position of Germany in the international context are examined in more detail.

Conducting and evaluating expert interviews with 34 experts from companies in exploration and production as well as raw materials processing, from industrial and nature conservation associations, science, state mining authorities and ministries provide information about raw material supply in Germany in 2021. At that time, the view is already dominated by the COVID-19 pandemic. The experts name 28 challenges, which actively influence them in the performance of their activities. The major obstacles perceived are the lack of acceptance for domestic raw material projects and Germany's reduced competitiveness in global raw material procurement. The experts also consider the duration of approval procedures for raw material extraction projects, the shortage of skilled workers and conflicts of interest between various players as particularly obstructive. The situation for domestic extraction is seen as rather pessimistic and the mining industry as a discontinued model.

The experts also comment on the role of the state and define necessary boundary conditions, such as more state support for domestic raw materials production, for foreign activities of German companies or a stronger integration of the topic in foreign and domestic policy, which should make Germany more competitive and sustainable in the supply of raw materials. The existing expertise as well as technical innovations are seen as measures to further develop and maintain various sectors and consequently as the basis of a resilient raw material supply for German industry.

The first case study deals with lithium. The lightest metal in the periodic table is used in the cathode of lithium-ion batteries (LIBs). LIBs currently represent the leading energy storage material for battery electric vehicles (BEVs). By 2030, more than ten battery cell production sites are expected

to be established in Germany, and more than 30 throughout Europe. The electrode metals (lithium, nickel, cobalt, manganese, aluminum) must currently be purchased from the world market. The scenario analysis carried out shows that battery cell production in Germany will require between 60.4 kt LCE (lithium carbonate equivalent) and 173.2 kt LCE in 2030.

To be able to cover the demand for lithium also domestically or by European resources, the extraction of lithium from deposits in the EU-27 is aimed at in various projects. As of May 2022, there are seven projects in an advanced stage of development that envisage industrial extraction of lithium from conventional, magmatic, or sedimentary deposits as well as from unconventional deposits, geothermal brines, from 2024, 2025 or 2026, depending on the project. The availability of primary lithium from the seven EU-27 projects is determined to be at a maximum of about 39.4 kt LCE/a. A supply of secondary lithium is calculated to be at a maximum of about 6.9 kt LCE/a.

Accordingly, depending on the scenario, in 2030 between 47.5 kt LCE/a and 173.2 kt LCE/a remain to be covered by supply chains from outside Europe, which would equate to a monetary value between US\$1.2 billion and US\$11.5 billion, depending on the price assumption. If existing purchase contracts of the lithium projects in the EU-27 are included and assuming a future reduction in lithium consumption in the cathodes as well as an increasing efficiency in recycling, the primary and secondary lithium from the EU-27 could cover the demand for lithium for the electrodes for battery cell production in Germany in 2030 to a maximum of 34.5 %. This results in an import dependency for the cathode metal lithium for Germany.

Other innovative extraction methods and processing technologies, such as lithium extraction from mine water of former mines or production water from natural gas or oil production, which are being researched recently, could further increase the supply of European lithium if technically and economically realized. The further development and expansion of recycling possibilities within Europe is also indispensable. However, the quantities of primary and secondary lithium will remain insufficient for the demand in 2030. The added lack of infrastructure for lithium refining and high energy costs will not allow for self-sufficient production of lithium-ion battery cells in 2030 in Europe. If Europe does not invest in all process steps of the value chain, it will continue to be dependent on Asian, especially Chinese, producers.

In the second and third case studies, the demand for selected, potentially critical raw materials is determined, which are necessary to produce hydrogen for material use in the German steel production in 2030. The industry sector "Production and first processing of iron and steel" (WZ 24 1-3) is the second largest greenhouse gas emitter in German industry. To minimize (carbon dioxide) emissions in steel production, the use of hydrogen is being tested in pilot projects. To produce hydrogen in a green way, it requires electrolyzers fed with electricity from renewable sources, in this case, with energy from wind turbines. Building a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer requires the use of iridium, while building a solid oxide (SO) electrolyzer requires the use of scandium. In wind turbines the rare earth elements neodymium, praseodymium, dysprosium, and terbium are used in permanent magnets.

Between 4.2 GW and 5.6 GW of electrolysis-capacity will be required to produce hydrogen for material use in German steel production in 2030. With a 45 % market share of PEM electrolysis (PEMEL) in Germany, between 2.8 % (0.2 t) and 4.3 % (0.3 t) of the 2018 global iridium production will be required for the one-time construction of the plants with a lifetime of approximately 20 years. Should SO electrolysis (SOEL) take 10 % of the market share, the scandium required to build the plants in the case study will range from 0.2 % (0.02 t) to 0.6 % (0.05 t) of the global production from the same year. To generate the necessary energy of about 36.5 TWh for water electrolysis, it requires installed capacity between 15.3 GW and 20.9 GW onshore and between 2.2 GW and 3.0 GW offshore. Further, between 821.5 t and 1050.2 t of neodymium, between 168.2 t and 215.8 t of praseodymium, between 174.8 t and 231.7 t of dysprosium and between 30.6 t and 39.0 t of terbium will be required to build the plants.

If no new deposits with the extraction of iridium as a by-product (e.g. nickel-copper deposits) are developed and the market division of electrolyzer technologies does not develop more strongly towards alternatives with a lower or no consumption of potentially critical raw materials, the availability of iridium for Germany may become critical. Due to the high global demand for rare earth elements and China's monopoly position in refining, European production in Sweden or Greenland, for example, and the establishment of a European refinery may be decisive for the availability of these for Germany.

To reduce the dependence on imports of raw material and semi-finished products in Germany, the discovery of and access to new deposits by independent companies, the establishment or maintenance of a smelting and refining infrastructure in Europe, material efficiency improvements, the promotion of sustainable technologies and the establishment of a European recycling value chain are essential.

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	iii
Kurzfassung .....	iv
Abstract .....	vii
Inhaltsverzeichnis .....	x
Abbildungsverzeichnis .....	xiv
Tabellenverzeichnis .....	xviii
Erklärung zur Originalität .....	xxiii
1. Einleitung .....	1
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Ziel und Zweck .....	2
1.3 Überblick der Arbeit .....	3
1.3.1 Herausforderungen bei der Rohstoffversorgung für Deutschland – eine holistische Betrachtung durch Experteninterviews (Kapitel 2) .....	3
1.3.2 Lithiumbedarf für die Batteriezellenfertigung in Deutschland und Europa im Jahr 2030 (Kapitel 3) .....	3
1.3.3 Iridium- und Scandiumbedarf für die Erzeugung von Elektrolyse-Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Stahlproduktion 2030 in Deutschland (Kapitel 4) .....	4
1.3.4 Bedarf Seltene Erden Elemente (Ny, Pr, Dy, Tb) für Windkraftanlagen zur Energiegewinnung für die Herstellung von Elektrolyse-Wasserstoff im Jahr 2030 in Deutschland (Kapitel 5) .....	4
1.4 Veröffentlichte Teile dieser Arbeit .....	5
2. Herausforderungen bei der Rohstoffversorgung für Deutschland – eine holistische Betrachtung durch Experteninterviews .....	6
2.1 Zusammenfassung .....	6
2.2 Einführung .....	7
2.3 Ausgangslage der Rohstoffversorgung für den Industriestandort Deutschland .....	10
2.4 Methodik .....	15
2.4.1 Phase 1: Sachverhalt darstellen .....	16
2.4.2 Phase 2: Planung und Vorbereitung der Experteninterviews .....	16
2.4.3 Phase 3: Ausführung .....	17
2.4.4 Phase 4: Auswertung und Analyse der Experteninterviews .....	18
2.5 Ergebnisse .....	20
2.5.1 Wirtschaftsstandort Deutschland .....	21
2.5.2 Staat/Regularien .....	24
2.5.3 Zusammenarbeit .....	30

2.5.4	Unternehmerische Rohstoffsicherung .....	31
2.5.5	Herausforderungen .....	33
2.6	Diskussion .....	41
2.6.1	Rohstoffversorgung für den Wirtschaftsstandort Deutschland.....	41
2.6.2	Rolle des Staates und Maßnahmen der Rohstoffstrategie .....	42
2.6.3	Faktenbasierte Zusammenarbeit.....	44
2.6.4	Globale Rohstoffbeschaffung der Industrie.....	44
2.6.5	Herausforderungen bei der Rohstoffversorgung für Deutschland.....	45
2.7	Schlussfolgerung .....	48
3.	Lithiumbedarf für die Batteriezellenfertigung in Deutschland und Europa im Jahr 2030 .....	49
3.1	Zusammenfassung .....	49
3.2	Einführung.....	51
3.3	Ausgangslage.....	52
3.3.1	Zukünftiger Lithiumbedarf .....	52
3.3.2	Lithium-Ressourcen und -Produktion .....	53
3.3.3	Wertschöpfungskette Lithium-Ionen-Batterie (LIB).....	56
3.4	Methodik .....	58
3.5	Ergebnisse .....	61
3.5.1	Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030.....	61
3.5.2	Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030 .....	64
3.5.3	Lithiumangebot in Europa.....	65
3.5.4	Lithiumbedarfsdeckung .....	72
3.6	Diskussion .....	86
3.6.1	Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030 .....	86
3.6.2	Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030 .....	87
3.6.3	Lithiumangebot in Europa.....	88
3.6.4	Lithiumbedarfsdeckung am außereuropäischen Markt .....	91
3.7	Schlussfolgerung .....	93
4.	Iridium- und Scandiumbedarf für die Erzeugung von Elektrolyse-Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland .....	94
4.1	Zusammenfassung .....	94
4.2	Einführung.....	95
4.3	Ausgangslage Iridium und Scandium.....	97
4.4	Methodik .....	99
4.5	Ergebnisse .....	101
4.5.1	Aufstellung der Annahmen für die Iridium- und Scandium-Bedarfsrechnung .....	101

4.5.2	Bedarf Elektrolysekapazität.....	104
4.5.3	Potenziell kritische Rohstoffe in Elektrolyseuren .....	105
4.6	Diskussion .....	111
4.6.1	Wasserstoffbedarf für die Stahlindustrie in Deutschland im Jahr 2030 .....	111
4.6.2	Elektrolyseure zur Wasserstoffproduktion für die Stahlindustrie in Deutschland im Jahr 2030 .....	111
4.6.3	Iridium- und Scandiumbedarf in Elektrolyseuren .....	112
4.7	Schlussfolgerung .....	114
5.	Bedarf Seltene Erden Elemente (Ny, Pr, Dy, Tb) für Windkraftanlagen zur Energiegewinnung für die Herstellung von Elektrolyse-Wasserstoff im Jahr 2030 in Deutschland .....	115
5.1	Zusammenfassung .....	115
5.2	Einführung.....	116
5.3	Ausgangslage.....	117
5.3.1	Strom aus Erneuerbaren Energien .....	117
5.3.2	Seltene Erden Elemente (SEE).....	119
5.4	Methodik .....	121
5.5	Ergebnisse .....	123
5.5.1	Berechnung Energiebedarf .....	123
5.5.2	Annahmen zur Energieerzeugung aus Windkraftanlagen .....	123
5.5.3	Modellierung und Berechnung der Energieerzeugung durch Windkraft.....	124
5.5.4	Berechnung des SEE-Bedarfs (Nd, Pr, Dy, Tb) in Windkraftanlagen .....	129
5.6	Diskussion .....	132
5.6.1	Energiebedarf und Modellierung der Energieerzeugung durch Windkraft .....	132
5.6.2	SEE-Bedarf in Windkraftanlagen.....	134
5.7	Schlussfolgerung .....	136
6.	Schlussfolgerung und Ausblick.....	137
6.1	Schlussfolgerung .....	137
6.2	Ausblick .....	139
7.	Anhang .....	141
7.1	Allgemeine Struktur der Leitfadeninterviews .....	141
7.2	Fragen der Leitfadeninterviews nach Expertenkatgorie .....	143
7.3	Batteriezellenproduktionsstandorte in Europa.....	147
7.4	Alternative Lithiumfördermethoden.....	150
7.4.1	Lithium aus Bergbauwässern .....	150
7.4.2	Lithium aus geförderten Lagerstättenwässern.....	150
7.4.3	Lithium aus Meerwasser.....	151
7.4.4	Lithium aus Salzlagerstätten.....	151

7.5	Abnahmevereinbarungen.....	152
7.6	Abnahmemengen von Vulcan Energie Ressourcen.....	153
7.7	Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Grundfall .....	154
7.8	Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall.....	155
7.9	Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Grundfall – Sensitivität 1 .....	156
7.10	Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall – Sensitivität 1.....	157
7.11	Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Grundfall – Sensitivität 2 .....	158
7.12	Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall – Sensitivität 2.....	159
7.13	Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Grundfall – Sensitivität 3 .....	160
7.14	Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall – Sensitivität 3.....	161
7.15	Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030 .....	162
7.16	Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030 – Sensitivitäten 1–3.....	163
7.17	Klima-, Energie- und Industrieziele in Deutschland .....	164
7.18	Dekarbonisierung der Stahlproduktion in Deutschland.....	167
7.19	Wasserstoffproduktion und Elektrolyseurtechnologien .....	169
7.20	Defizit- und Überschusserzeugung.....	171
8.	Literaturverzeichnis.....	178

# Abbildungsverzeichnis

<b>ABBILDUNG 2.1:</b> BEREICHE FÜR HANDLUNGSMAßNAHMEN ZUR ROHSTOFFVERSORGUNG IN DEUTSCHLAND (BARDT, 2008 UND 2014; ERDMANN UND BEHRENDT, 2011; ACATECH, 2017; BDI, 2018A; WEDIG, 2019 (VRB); GERRI, 2021; MARSCHIEDER-WEIDEMANN ET AL., 2021 (DERA)).	9
<b>ABBILDUNG 2.2:</b> ENTWICKLUNG DER BRUTTOWERTSCHÖPFUNG (BWS) IN DEUTSCHLAND (NACH DESTATIS, 2021C). *AUSGEWÄHLTE WIRTSCHAFTSZWEIGE DER INDUSTRIE: PAPIER, CHEMIE, KUNSTSTOFFE, METALLERZEUGUNG UND -BEARBEITUNG, METALLERZEUGNISSE, ELEKTRONIK, ELEKTRISCHE AUSRÜSTUNGEN, MASCHINENBAU, KRAFTWAGEN UND SONSTIGER FAHRZEUGBAU.	11
<b>ABBILDUNG 2.3:</b> PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH IN DEUTSCHLAND IN PJ FÜR DIE JAHRE LINKS 1990 UND RECHTS 2020. DER GESAMTPRIMÄRENERGIEVERBRAUCH PRO JAHR IST VON 1990 BIS 2020 UM CA. 3 EJ GESUNKEN, DER ANTEIL AN FOSSILEN ENERGIETRÄGERN IST DABEI VON 87 % AUF 76,3 % GESUNKEN, WOBEI DER ANTEIL AN ERDGAS VON 15,4 % AUF 26,4 % GESTIEGEN IST (NACH BMWK, 2022).	13
<b>ABBILDUNG 2.4:</b> PROZESS EXPERTENINTERVIEWS, DARSTELLUNG DES ABLAUFES (NACH KAISER, 2014; MAYRING UND FRENZEL, 2019).	15
<b>ABBILDUNG 2.5:</b> ANGEFRAGTE UND DURCHGEFÜHRTE EXPERTENINTERVIEWS.	18
<b>ABBILDUNG 2.6:</b> NACH DER AUSWERTUNG DER HERAUSFORDERUNGEN DEFINIERTE BEREICHE.	19
<b>ABBILDUNG 2.7:</b> EINTEILUNG DER EXPERTEN AUF ROHSTOFFARTEN.	20
<b>ABBILDUNG 2.8:</b> EINTEILUNG DER EXPERTEN AUF HIERARCHIEEBENEN.	20
<b>ABBILDUNG 2.9:</b> INTERVIEWERGEBNISSE FRAGE 1.1, THEMENFELD WIRTSCHAFTSSTANDORT DEUTSCHLAND.	21
<b>ABBILDUNG 2.10:</b> INTERVIEWERGEBNISSE FRAGE 1.2, THEMENFELD WIRTSCHAFTSSTANDORT DEUTSCHLAND.	23
<b>ABBILDUNG 2.11:</b> ERGEBNISSE FRAGE 1.3, THEMENFELD WIRTSCHAFTSSTANDORT DEUTSCHLAND.	23
<b>ABBILDUNG 2.12:</b> INTERVIEWERGEBNISSE FRAGE 2.1.1, THEMENFELD STAAT/REGULARIEN.	24
<b>ABBILDUNG 2.13:</b> INTERVIEWERGEBNISSE FRAGE 2.1.2, THEMENFELD STAAT/REGULARIEN.	25
<b>ABBILDUNG 2.14:</b> ERGÄNZUNGEN ZU DEN INTERVIEWERGEBNISSEN VON FRAGEN 2.1.1 UND 2.1.2. THEMEN, UM DIE DER STAAT SICH VERSTÄRKT KÜMMERN SOLLTE, THEMENFELD STAAT/REGULARIEN.	26
<b>ABBILDUNG 2.15:</b> INTERVIEWERGEBNISSE FRAGE 2.2, THEMENFELD (2) STAAT/REGULARIEN.	26
<b>ABBILDUNG 2.16:</b> ERGÄNZUNGEN ZU DEN ERGEBNISSEN VON FRAGE 2.2, THEMENFELD (2) STAAT/REGULARIEN.	27
<b>ABBILDUNG 2.17:</b> INTERVIEWERGEBNISSE ZU FRAGE 2.3, THEMENFELD (2) STAAT/REGULARIEN.	28
<b>ABBILDUNG 2.18:</b> INTERVIEWERGEBNISSE ZU FRAGE 2.4, THEMENFELD (2) STAAT/REGULARIEN.	29
<b>ABBILDUNG 2.19:</b> ERGÄNZUNG ZU DEN INTERVIEWERGEBNISSEN ZU FRAGE 2.4, THEMENFELD (2) STAAT/REGULARIEN.	30
<b>ABBILDUNG 2.20:</b> ERGEBNISSE ZUR FRAGE NACH DER ZUSAMMENARBEIT MIT LANDESBERGBEHÖRDEN/UNTERNEHMEN.	31
<b>ABBILDUNG 2.21:</b> ERGEBNIS FRAGE 4.3, THEMENFELD ROHSTOFFSICHERUNG.	32
<b>ABBILDUNG 2.22:</b> ERGEBNISSE „DISZIPLINÜBERGREIFENDE HERAUSFORDERUNGEN“.	34
<b>ABBILDUNG 2.23:</b> ERGEBNISSE „HERAUSFORDERUNGEN UNTERNEHMEN ODER DIE WIRTSCHAFT BETREFFEND“. (1) FEHLENDE TRANSPARENZ VON UNTERNEHMEN ZU ROHSTOFFZAHLEN, (2) FEHLENDE ROUTINE IN GENEHMIGUNGSPROZESSEN.	35
<b>ABBILDUNG 2.24:</b> ERGEBNISSE „HERAUSFORDERUNGEN ADMINISTRATIVE ABLÄUFE UND BEHÖRDEN BETREFFEND“. * IN DEN BEHÖRDEN.	36
<b>ABBILDUNG 2.25:</b> ERGEBNISSE „HERAUSFORDERUNGEN DIE POLITIK UND GESETZGEBUNG BETREFFEND“.	37
<b>ABBILDUNG 2.26:</b> HERAUSFORDERUNGEN FÜR DIE ROHSTOFFVERSORGUNG IN DEUTSCHLAND AUS SICHT DER INTERNATIONALEN EXPERTEN AUS DEN KATEGORIEN A1 UND A3.	37
<b>ABBILDUNG 3.1:</b> LITHIUMNACHFRAGE FÜR DIE E-MOBILITÄT IM JAHR 2030 IN DER EU-27 UND WEITEREN EUROPÄISCHEN LÄNDERN (NACH SCHMIDT, 2022; GREGOIR UND VAN ACKER, 2022; BOBBA ET AL., 2020).	53
<b>ABBILDUNG 3.2:</b> VERTEILUNG DER IDENTIFIZIERTEN LITHIUMRESSOURCEN WELTWEIT IN MILLIONEN TONNEN (STAND 2021; USGS, 2022).	53

<b>ABBILDUNG 3.3:</b> ENTWICKLUNG WELTWEITER LITHIUMPRODUKTION UND VERWENDUNG IN BATTERIETECHNOLOGIEN (IN KT LITHIUM) SOWIE DIE ENTWICKLUNG DER EXPLORIERTEN LITHIUMRESERVEN UND -RESSOURCEN (IN MIO. T LITHIUM) (NACH USGS, 2002–2022).	54
<b>ABBILDUNG 3.4:</b> VEREINFACHTE DARSTELLUNG DER WERTSCHÖPFUNGSKETTE EINER LIB FÜR DIE E-MOBILITÄT (NACH VÄYRYNEN UND SALMINEN, 2012; HEIMERS ET AL., 2018, 2018A; KARABELLI UND OBERLE, 2022).	56
<b>ABBILDUNG 3.5:</b> EIGENE DARSTELLUNG DER GEPLANTEN MAXIMALEN BATTERIEZELLENPRODUKTIONSKAPAZITÄTEN IN GWH IM JAHR 2030 IN EUROPA NACH LÄNDERN (NACH ANHANG 7.3, TAB. 7.2). *EUROPA: DER VOLKSWAGEN-KONZERN PLANT INSGESAMT SECHS BATTERIEZELLENPRODUKTIONSSTÄTTEN MIT EINER GESAMTKAPAZITÄT VON 240 GWH IN EUROPA, FÜR 100 GWH WURDEN DIE STANDORTE NOCH NICHT GENAUER DEFINIERT (VW, 2022A).	61
<b>ABBILDUNG 3.6:</b> LITHIUMBEDARF UND AUFTEILUNG DER LITHIUMNACHFRAGEDECKUNG FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030 IM GRUNDFALL (SZENARIENAUFSTELLUNG IN ANHANG 7.7, TAB. 7.5).	72
<b>ABBILDUNG 3.7:</b> LITHIUMBEDARF UND AUFTEILUNG DER LITHIUMNACHFRAGEDECKUNG FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030 IM PRAXISFALL. DAS WENIGSTE LITHIUM VOM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT MUSS IN DEN FÄLLEN I <sub>9</sub> (34.952 T LCE) IN S <sub>1NEU</sub> , I <sub>18</sub> (68.198 T LCE) IN S <sub>2NEU</sub> UND I <sub>27</sub> (130.903 T LCE) IN S <sub>3NEU</sub> BESCHAFFT WERDEN (SZENARIENAUFSTELLUNG IN ANHANG 7.9, TAB. 7.6).	75
<b>ABBILDUNG 3.8:</b> EIGENVERSORGUNG DURCH EUROPÄISCHES PRIMÄR- UND SEKUNDÄRLITHIUM UND BEDARF AUF DEM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR DIE EUROPÄISCHE BATTERIEZELLENPRODUKTION IM JAHR 2030 (ANHANG 7.15, TAB. 7.13).	76
<b>ABBILDUNG 3.9:</b> PREISENTWICKLUNG VON LITHIUMKARBONAT (FÜR DIE JAHRE 1991 BIS 2002 UND 2017 BIS 2021: USGS, 1991–2022; FÜR DIE JAHRE 2003 BIS 2016: METALARY, 2022) UND PROGNOSE (AUS TAB. 3.20) FÜR DAS JAHR 2030.	78
<b>ABBILDUNG 3.10:</b> DURCH EFFIZIENZSTEIGERUNG MIT EINER REDUKTION DES LITHIUMVERBRAUCHS (-5 % UND -8 %) REDUZIERTER LITHIUMBEDARFSMENGE AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR DEN GRUNDFALL IN DEN SZENARIEN DES MINIMALEN (I <sub>9</sub> , I <sub>18</sub> , I <sub>27</sub> ) UND MAXIMALEN BEDARFS (I <sub>1</sub> , I <sub>10</sub> , I <sub>19</sub> ). (SZENARIENAUFSTELLUNG IN ANHANG 7.9, TAB. 7.7 UND ANHANG 7.11, TAB. 7.9).	80
<b>ABBILDUNG 3.11:</b> DURCH EFFIZIENZSTEIGERUNG MIT EINER REDUKTION DES LITHIUMVERBRAUCHS (-5 % UND -8 %) REDUZIERTER LITHIUMBEDARFSMENGE AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR DEN PRAXISFALL IN DEN SZENARIEN DES MINIMALEN (I <sub>9</sub> , I <sub>18</sub> , I <sub>27</sub> ) UND MAXIMALEN BEDARFS (I <sub>1</sub> , I <sub>10</sub> , I <sub>19</sub> ). (SZENARIENAUFSTELLUNG IN ANHANG 7.10, TAB. 7.8 UND ANHANG 7.12, TAB. 7.10).	81
<b>ABBILDUNG 3.12:</b> DURCH EFFIZIENZSTEIGERUNG MIT EINER REDUKTION DES LITHIUMVERBRAUCHS (-5 % UND -8 %) REDUZIERTER LITHIUMBEDARFSMENGE AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR EUROPA (ANHANG 7.16, TAB. 7.14).	82
<b>ABBILDUNG 3.13:</b> REDUZIERTER LITHIUMBEDARFSMENGE AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT IN DEN SZENARIEN DES MINIMALEN (I <sub>9</sub> , I <sub>18</sub> , I <sub>27</sub> ) UND MAXIMALEN BEDARFS (I <sub>1</sub> , I <sub>10</sub> , I <sub>19</sub> ) FÜR DEN GRUNDFALL, SENSITIVITÄT 1, 2 UND 3 IM VERGLEICH. (SZENARIENAUFSTELLUNG SENSITIVITÄT 3 IN ANHANG 7.13, TAB. 7.11).	83
<b>ABBILDUNG 3.14:</b> REDUZIERTER LITHIUMBEDARFSMENGE AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT IN DEN SZENARIEN DES MINIMALEN (I <sub>9</sub> , I <sub>18</sub> , I <sub>27</sub> ) UND MAXIMALEN BEDARFS (I <sub>1</sub> , I <sub>10</sub> , I <sub>19</sub> ) FÜR DEN PRAXISFALL, SENSITIVITÄT 1, 2 UND 3 IM VERGLEICH. (SZENARIENAUFSTELLUNG SENSITIVITÄT 3 IN ANHANG 7.14, TAB. 7.12).	84
<b>ABBILDUNG 3.15:</b> DURCH EFFIZIENZSTEIGERUNG MIT EINER REDUKTION DES LITHIUMVERBRAUCHS (-8 %) UND ERHÖHUNG DES SEKUNDÄRLITHIUMS REDUZIERTER LITHIUMBEDARFSMENGE AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR EUROPA, IM VERGLEICH DIE GRUNDANNAHME UND DIE SENSITIVITÄTEN 1 -3 (ANHANG 7.16, TAB. 7.14).	85
<b>ABBILDUNG 4.1:</b> GLOBALE NACHFRAGE NACH IRIIDIUM IN DEN JAHREN 2017 BIS 2022 (NACH COWLEY, 2022).	97
<b>ABBILDUNG 4.2:</b> GLOBALE PLATIN- UND PALLADIUMPRODUKTION UND RESERVEN IM JAHR 2021 (USGS, 2022).	98
<b>ABBILDUNG 4.3:</b> WASSERSTOFFBEDARF IN DER STAHLPRODUKTION IM JAHR 2030 IN DEUTSCHLAND NACH VERSCHIEDENEN QUELLEN. DIE ANGABE VON NEUWIRTH ET AL. (2022) IST NICHT AUF DAS JAHR 2030 BEZOGEN, DER BEDARF IST ANGEZEIGT FÜR DEN ZEITPUNKT, IN DEM DIE KOMPLETTE UMSTELLUNG DER PRIMÄRROUTE DER STAHLPRODUKTION ERFOLGT.	101

<b>ABBILDUNG 5.1:</b> REALISIERTE ERZEUGUNG (TWh), INSTALLIERTE LEISTUNG ZUM 01.01. DES FOLGEJAHRES (GW) UND MAXIMAL MÖGLICHE ERZEUGUNG (TWh) IN DEN JAHREN 2015 BIS 2021 (NACH BUNDESNETZAGENTUR, 2022). .....	117
<b>ABBILDUNG 5.2:</b> WINDENERGIE IN DEUTSCHLAND: REALISIERTE ERZEUGUNG, AUSFALLARBEIT UND INSTALLIERTE LEISTUNG IN DEN JAHREN 2015 BIS 2021. DIE INSTALLIERTE LEISTUNG IST DIE LEISTUNG, DIE POTENZIELL IN GW ERBRACHT WERDEN KÖNNTE. DIE REALISIERTE ERZEUGUNG IST DIE ENERGIE, DIE TATSÄCHLICH ERBRACHT WURDE (TWh) (NACH BUNDESNETZAGENTUR, BUNDESKARTELLAMT, 2022). .....	119
<b>ABBILDUNG 5.3:</b> SELTENE ERDEN ELEMENTE-MINENPRODUKTION UND RESERVEN GEMESSEN IN SELTENE ERDEN OXIDE (NACH USGS, 2001–2022). .....	120
<b>ABBILDUNG 5.4:</b> SELTENE ERDEN ELEMENTE-MINENPRODUKTION UND RESERVEN NACH LÄNDERN IM JAHR 2021 GEMESSEN IN SELTENE ERDEN OXIDE (NACH USGS, 2022). .....	120
<b>ABBILDUNG 5.5:</b> MODELLIERTE DEFIZITPERIODEN IN MWh UND MINUTEN ALLER SIEBEN BEZUGSJAHRE 2015 BIS 2021 .....	128
<b>ABBILDUNG 5.6:</b> MODELLIERTE ÜBERSCHUSSPERIODEN IN MWh UND MINUTEN ALLER SIEBEN BEZUGSJAHRE 2015 BIS 2021. ....	129
<b>ABBILDUNG 7.1:</b> DARSTELLUNG DES PRIMÄRENERGIEVERBRAUCHS (PEV), DES ENDENERGIEVERBRAUCHS (EEV) UND DES BRUTTOSTROMVERBRAUCHS (BSV) [1 TWh = 3,6 PJ] IM JAHR 2019 IN DEUTSCHLAND (NACH BMWK, 2022). .....	165
<b>ABBILDUNG 7.2:</b> ENTWICKLUNG DER BRUTTOSTROMERZEUGUNG AUS ERNEUERBAREN ENERGIEN SOWIE DER GESAMTEN DEUTSCHEN ENERGIEERZEUGUNG, INKL. KOHLE, ERDGAS, ERDÖL UND KERNKRAFT, IN DEN JAHREN 1990–2021 (NACH BMWK, 2022). .....	165
<b>ABBILDUNG 7.3:</b> BRUTTOWERTSCHÖPFUNG IN DEUTSCHLAND IN DEN JAHREN 2005 BIS 2020 IN DER INDUSTRIE, DER METALLERZEUGUNG UND -BEARBEITUNG, SOWIE DIE GESAMTE DEUTSCHE BRUTTOWERTSCHÖPFUNG (NACH DESTATIS, 2022A, B, C). .....	167
<b>ABBILDUNG 7.4:</b> THG-EMISSIONEN GESAMT UND ANTEILIG FÜR DIE INDUSTRIE ZWISCHEN DEN JAHREN 2000 BIS 2020 IN DEUTSCHLAND (NACH DESTATIS, 2022E). .....	168
<b>ABBILDUNG 7.5:</b> DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSERZEUGUNG (MWh) IM JAHR 2030 DURCH DAS MODELLIERTE BEZUGSJAHR 2021. 0 STELLT DIE BENÖTIGTE ENERGIE FÜR DIE ELEKTROLYSEURE JE VIERTELSTUNDE DAR (1.041 MWh). .....	171
<b>ABBILDUNG 7.6:</b> DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSPERIODEN (MINUTEN) IM JAHR 2030 DURCH DAS MODELLIERTE BEZUGSJAHR 2021. 0 STELLT DEN ZEITPUNKT DAR, AN DEM DIE PERIODE, GEMESSEN AN DER BENÖTIGTEN ENERGIEERZEUGUNG FÜR DIE ELEKTROLYSEURE (1.041 MWh), VON DEFIZIT ZU ÜBERSCHUSS ODER ANDERSHERUM GEWECHSELT HAT. ....	171
<b>ABBILDUNG 7.7:</b> DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSERZEUGUNG (MWh) IM JAHR 2030 DURCH DAS MODELLIERTE BEZUGSJAHR 2020. 0 STELLT DIE BENÖTIGTE ENERGIE FÜR DIE ELEKTROLYSEURE JE VIERTELSTUNDE DAR (1.041 MWh). .....	172
<b>ABBILDUNG 7.8:</b> DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSPERIODEN (MINUTEN) IM JAHR 2030 DURCH DAS MODELLIERTE BEZUGSJAHR 2020. 0 STELLT DEN ZEITPUNKT DAR, AN DEM DIE PERIODE, GEMESSEN AN DER BENÖTIGTEN ENERGIEERZEUGUNG FÜR DIE ELEKTROLYSEURE (1.041 MWh), VON DEFIZIT ZU ÜBERSCHUSS ODER ANDERSHERUM GEWECHSELT HAT. ....	172
<b>ABBILDUNG 7.9:</b> DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSERZEUGUNG (MWh) IM JAHR 2030 DURCH DAS MODELLIERTE BEZUGSJAHR 2019. 0 STELLT DIE BENÖTIGTE ENERGIE FÜR DIE ELEKTROLYSEURE JE VIERTELSTUNDE DAR (1.041 MWh). .....	173
<b>ABBILDUNG 7.10:</b> DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSPERIODEN (MINUTEN) IM JAHR 2030 DURCH DAS MODELLIERTE BEZUGSJAHR 2019. 0 STELLT DEN ZEITPUNKT DAR, AN DEM DIE PERIODE, GEMESSEN AN DER BENÖTIGTEN ENERGIEERZEUGUNG FÜR DIE ELEKTROLYSEURE (1.041 MWh), VON DEFIZIT ZU ÜBERSCHUSS ODER ANDERSHERUM GEWECHSELT HAT. ....	173
<b>ABBILDUNG 7.11:</b> DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSERZEUGUNG (MWh) IM JAHR 2030 DURCH DAS MODELLIERTE BEZUGSJAHR 2018. 0 STELLT DIE BENÖTIGTE ENERGIE FÜR DIE ELEKTROLYSEURE JE VIERTELSTUNDE DAR (1.041 MWh). .....	174
<b>ABBILDUNG 7.12:</b> DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSPERIODEN (MINUTEN) IM JAHR 2030 DURCH DAS MODELLIERTE BEZUGSJAHR 2018. 0 STELLT DEN ZEITPUNKT DAR, AN DEM DIE PERIODE, GEMESSEN AN DER BENÖTIGTEN	

---

ENERGIEERZEUGUNG FÜR DIE ELEKTROLYSEURE (1.041 MWh), VON DEFIZIT ZU ÜBERSCHUSS ODER ANDERSHERUM GEWECHSELT HAT. ....	174
<b>ABBILDUNG 7.13:</b> DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSERZEUGUNG (MWh) IM JAHR 2030 DURCH DAS MODELLIERTE BEZUGSJAHR 2017. 0 STELLT DIE BENÖTIGTE ENERGIE FÜR DIE ELEKTROLYSEURE JE VIERTELSTUNDE DAR (1.041 MWh).....	175
<b>ABBILDUNG 7.14:</b> DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSPERIODEN (MINUTEN) IM JAHR 2030 DURCH DAS MODELLIERTE BEZUGSJAHR 2017. 0 STELLT DEN ZEITPUNKT DAR, AN DEM DIE PERIODE, GEMESSEN AN DER BENÖTIGTEN ENERGIEERZEUGUNG FÜR DIE ELEKTROLYSEURE (1.041 MWh), VON DEFIZIT ZU ÜBERSCHUSS ODER ANDERSHERUM GEWECHSELT HAT. ....	175
<b>ABBILDUNG 7.15:</b> DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSERZEUGUNG (MWh) IM JAHR 2030 DURCH DAS MODELLIERTE BEZUGSJAHR 2016. 0 STELLT DIE BENÖTIGTE ENERGIE FÜR DIE ELEKTROLYSEURE JE VIERTELSTUNDE DAR (1.041 MWh).....	176
<b>ABBILDUNG 7.16:</b> DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSPERIODEN (MINUTEN) IM JAHR 2030 DURCH DAS MODELLIERTE BEZUGSJAHR 2016. 0 STELLT DEN ZEITPUNKT DAR, AN DEM DIE PERIODE, GEMESSEN AN DER BENÖTIGTEN ENERGIEERZEUGUNG FÜR DIE ELEKTROLYSEURE (1.041 MWh), VON DEFIZIT ZU ÜBERSCHUSS ODER ANDERSHERUM GEWECHSELT HAT. ....	176
<b>ABBILDUNG 7.17:</b> DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSERZEUGUNG (MWh) IM JAHR 2030 DURCH DAS MODELLIERTE BEZUGSJAHR 2015. 0 STELLT DIE BENÖTIGTE ENERGIE FÜR DIE ELEKTROLYSEURE JE VIERTELSTUNDE DAR (1.041 MWh).....	177
<b>ABBILDUNG 7.18:</b> DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSPERIODEN (MINUTEN) IM JAHR 2030 DURCH DAS MODELLIERTE BEZUGSJAHR 2015. 0 STELLT DEN ZEITPUNKT DAR, AN DEM DIE PERIODE, GEMESSEN AN DER BENÖTIGTEN ENERGIEERZEUGUNG FÜR DIE ELEKTROLYSEURE (1.041 MWh), VON DEFIZIT ZU ÜBERSCHUSS ODER ANDERSHERUM GEWECHSELT HAT. ....	177

# Tabellenverzeichnis

<b>TABELLE 2.1:</b> INTERVIEWKATEGORIEN ( <sup>1</sup> EINTEILUNG DER UNTERNEHMENSGRÖÖE NACH EU-KOMMISSION, 2003). .....	16
<b>TABELLE 2.2:</b> THEMENFELDER UND ANZAHL DER FRAGEN AN DIE EXPERTEN IN DEN JEWELIGEN EXPERTENKATEGORIEN.....	17
<b>TABELLE 2.3:</b> ZUORDNUNG DER EXPERTEN ZU DEN EXPERTENKATEGORIEN MITTELS CODIERUNG .....	18
<b>TABELLE 2.4:</b> BEWERTUNGSMÖGLICHKEITEN DER INTERVIEWANTWORTEN.....	19
<b>TABELLE 2.5:</b> ÜBERSICHT DER GENANNTEN HERAUSFORDERUNGEN DER EXPERTEN. EXPERTEN #3, 4, 34 UND 5 SIND INTERNATIONALE EXPERTEN. ....	38
<b>TABELLE 2.6:</b> ÜBERSICHT DER BEWERTUNG DER EXPERTENANTWORTEN DER IN KAPITEL 2.5 IN DIE AUSWERTUNG EINBEZOGENEN FRAGEN. DIE AUFLISTUNG DER FRAGEN IST IM ANHANG 7.2 IN TAB. 7.1 ZU FINDEN. ....	40
<b>TABELLE 3.1:</b> UMRECHNUNGSFAKTOREN EINES LITHIUMPRODUKTS IN LITHIUMKARBONATÄQUIVALENTE (LCE) (S. Z. B. SCHMIDT, 2017).....	60
<b>TABELLE 3.2:</b> GEPLANTE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030 (NACH ANHANG 7.3, TAB. 7.2). *AUTOMOTIVE CELL COMPANY = ACC, EIN JOINT VENTURE VON STELLANTIS, SAFT, MERCEDES, TOTAL.....	62
<b>TABELLE 3.3:</b> WEITERE GEPLANTE BATTERIEZELLENPRODUKTIONSSTANDORTE IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030 (NACH GRAUPNER, 2022; CIC ENERGIGUNE, 2021). ....	63
<b>TABELLE 3.4:</b> SZENARIEN DER BATTERIEZELLENPRODUKTIONSKAPAZITÄT IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030.....	63
<b>TABELLE 3.5:</b> SZENARIEN DER BATTERIEZELLENPRODUKTIONSKAPAZITÄT IN EUROPA IM JAHR 2030. ....	63
<b>TABELLE 3.6:</b> SPEZIFISCHE LITHIUMMENGE VERSCHIEDENER KATHODENTYPEN (STAND ENDE 2021) MIT ENTSPRECHENDEN PROGNOSTIZIERTEN MARKTANTEILEN IM JAHR 2030 (MARSCHIEDER-WEIDEMANN ET AL., 2021). ....	64
<b>TABELLE 3.7:</b> BERECHNETER LITHIUMBEDARF FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030.....	64
<b>TABELLE 3.8:</b> BERECHNETER LITHIUMBEDARF IN T LCE FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN EUROPA IM JAHR 2030.....	65
<b>TABELLE 3.9:</b> DATEN DER LITHIUMPROJEKTE (STAND MITTE 2022; NACH SAVANNAH RESOURCES PLC, 2018, 2022; BACANORA, 2019; ZINNWALD LITHIUM, 2021, 2022; TAGESSCHAU, 2021; EUROPEAN METALS HOLDING LTD, 2022; S&P GLOBAL, 2021; EUROPEAN LITHIUM LTD., 2021; KELIBER, 2022; INFINITY LITHIUM, 2021, 2022; VER, 2020, 2022; RIO TINTO, 2020).....	67
<b>TABELLE 3.10:</b> ÜBERSICHT ÜBER DIE RESSOURCEN- UND RESERVENANGABEN DER LITHIUMPROJEKTE AUS FESTGESTEIN (STAND MITTE 2022; NACH SAVANNAH RESOURCES PLC, 2021; BACANORA, 2019; EUROPEAN METALS HOLDING LTD, 2021; EUROPEAN LITHIUM LTD., 2022; KELIBER, 2021; INFINITY LITHIUM, 2021). 67	67
<b>TABELLE 3.11:</b> POTENZIELLES LITHIUMANGEBOT AUS DER EU-27 NACH ABZUG BEREITS VEREINBARTER ABNAHMEMENGEN (STAND AUGUST 2022; NACH SAVANNAH RESOURCES PLC, 2022, 2021A; ZINNWALD LITHIUM, 2021, 2022; TAGESSCHAU, 2021; EUROPEAN METALS HOLDING LTD, 2022; S&P GLOBAL, 2021; EUROPEAN LITHIUM LTD., 2021, 2021A; KELIBER, 2022; INFINITY LITHIUM, 2021, 2022, 2022A; VER, 2021A- D, 2022, 2022C; RIO TINTO, 2020). ....	69
<b>TABELLE 3.12:</b> ANGEBOTSSZENARIEN DER PRIMÄRLITHIUMMENGEN AUS DER EU-27 FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IM JAHR 2030 IN DEUTSCHLAND. ....	70
<b>TABELLE 3.13:</b> MARKTANTEILE DER BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND AN DER BATTERIEZELLENPRODUKTION IN EUROPA IM JAHR 2030 IN DEN BATTERIEZELLENPRODUKTIONSSZENARIEN S <sub>1</sub> -S <sub>3</sub> .....	70
<b>TABELLE 3.14:</b> ANGEBOTSSZENARIEN DER PRIMÄRLITHIUMMENGEN AUS DER EU-27 FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IM JAHR 2030 IN DEUTSCHLAND ENTSPRECHEND DER BATTERIEZELLENPRODUKTIONSSZENARIEN.....	71
<b>TABELLE 3.15:</b> RECYCLINGSZENARIEN JEWELNS IN ABHÄNGIGKEIT DER BATTERIEZELLENPRODUKTIONSKAPAZITÄTEN S <sub>1</sub> -S <sub>3</sub> .....	71

<b>TABELLE 3.16:</b> NEU BERECHNETER LITHIUMBEDARF FÜR DIE UNTERNEHMEN STELLANTIS UND VOLKSWAGEN ENTSPRECHEND DEN ABNAHMEMENGEN MIT DER VER (ANHANG 7.6).....	73
<b>TABELLE 3.17:</b> NEU BERECHNETER LITHIUMBEDARF FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION 2030 IN DEUTSCHLAND FÜR DIE DREI BATTERIEZELLENPRODUKTIONSKAPAZITÄTEN $S_{1\text{NEU}}-S_{3\text{NEU}}$ .....	74
<b>TABELLE 3.18:</b> NEU BERECHNETE BATTERIEZELLENPRODUKTIONSKAPAZITÄTSWERTE $S_{1\text{NEU}}-S_{3\text{NEU}}$ .....	74
<b>TABELLE 3.19:</b> SZENARIEN ZUR LITHIUMBEDARFSDECKUNG FÜR DIE EUROPÄISCHE BATTERIEZELLENPRODUKTION IM JAHR 2030.....	76
<b>TABELLE 3.20:</b> AUFLISTUNG VERSCHIEDENER PREISANGABEN FÜR LITHIUMHYDROXID MONOHYDRAT UND LITHIUMKARBONAT IM JAHR 2022 (VER, 2022D, E; ARGUS MEDIA GROUP, 2022, 2022A; SCHMIDT, 2022). .....	77
<b>TABELLE 3.21:</b> PREISSZENARIEN FÜR DIE MONETÄRE BEWERTUNG DER NOTWENDIGEN LITHIUMNACHFRAGE AUF DEM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT (USGS, 2022; GOLDINVEST, 2022; ARGUS MEDIA GROUP, 2022A).....	78
<b>TABELLE 3.22:</b> KOSTEN DES LITHIUMBEDARFS AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR DEN GRUNDFALL, DEN PRAXISFALL UND EUROPA IN DEN SZENARIEN MIT DEM MINIMALEN UND DEM MAXIMALEN BEDARF AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT. ....	79
<b>TABELLE 3.23:</b> BERECHNUNG DER EFFIZIENZSTEIGERUNGSRATEN FÜR DEN LITHIUMVERBRAUCH IN UNTERSCHIEDLICHEN KATHODENTECHNOLOGIEN IM JAHR 2030 (MARSCHIEDER-WEIDEMANN ET AL., 2021; IEA, 2018; HUND ET AL., 2020). .....	80
<b>TABELLE 3.24:</b> RECYCLINGSZENARIEN DER SENSITIVITÄTSANALYSE. ....	82
<b>TABELLE 3.25:</b> KOSTENAUFSTELLUNG IM GRUND- UND PRAXISFALL JEWEILS IM VERGLEICH MIT DER DRITTEN SENSITIVITÄT DES MINIMALEN (I9, I18, I10) UND MAXIMALEN BEDARFS (I1, I10, I19). ....	84
<b>TABELLE 4.1:</b> WASSERSTOFFBEDARF IN DER STAHLPRODUKTION IM JAHR 2030 IN DEUTSCHLAND NACH VERSCHIEDENEN QUELLEN. DIE ANGABE VON NEUWIRTH ET AL. (2022) IST NICHT AUF DAS JAHR 2030 BEZOGEN, DER BEDARF IST ANGEGEBEN FÜR DEN ZEITPUNKT, IN DEM DIE KOMPLETTE UMSTELLUNG DER PRIMÄRRROUTE DER STAHLPRODUKTION ERFOLGT. (*STOFFLICH).....	102
<b>TABELLE 4.2:</b> MARKTVERTEILUNG DER ELEKTROLYSEURTECHNOLOGIEN FÜR DAS JAHR 2030 IN DEUTSCHLAND SOWIE FÜR DIE VORLIEGENDE STUDIE HERANGEZOGENE ELEKTROLYSEURMODELLE (NACH SMOLINKA ET AL., 2018; SIEMENS ENERGY, 2019; SUNFIRE GMBH, 2021, 2022). ....	102
<b>TABELLE 4.3:</b> TECHNISCHE DATEN DER ZUR WEITEREN BERECHNUNG HERANGEZOGENEN ELEKTROLYSEURTECHNOLOGIEN (SIEMENS ENERGY 2019, 2021; SUNFIRE GMBH, 2021, 2021A, 2022). DIE BLAU UND KURSIV GESCHRIEBENEN ZAHLEN SIND ANGABEN DER HERSTELLER, DIE SCHWARZ GESCHRIEBENEN WURDEN SELBST BERECHNET. ....	103
<b>TABELLE 4.4:</b> ANNAHMEÜBERSICHT FÜR DIE BERECHNUNG DES BEDARFS AN KRITISCHEN ROHSTOFFEN (IRIDIUM UND SCANDIUM). ....	104
<b>TABELLE 4.5:</b> BERECHNUNG DER ELEKTROLYSEKAPAZITÄTEN IN FALL 1 UND FALL 2 FÜR DIE WASSERSTOFFPRODUKTION FÜR DIE STOFFLICHE NUTZUNG IN DER STAHLPRODUKTION IM JAHR 2030 IN DEUTSCHLAND (MARKTVERTEILUNG UND TECHNISCHE DATEN NACH SMOLINKA ET AL., 2018; SUNFIRE GMBH, 2021, 2021A, 2022; SIEMENS ENERGY, 2019, 2021, S. KAPITEL 4.5.1). ....	105
<b>TABELLE 4.6:</b> ROHSTOFFBEDARF IN ELEKTROLYSEURTECHNOLOGIEN (NACH DERA, 2022; ACATECH UND DECHEMA, 2022; BELLINI ET AL., 2022; MARSCHIEDER-WEIDEMANN ET AL., 2021; KIEMEL ET AL., 2021; GRÜNBERG, 2021; IEA, 2021A; BAREIß ET AL., 2019; SMOLINKA ET AL., 2018; ZAUNER UND REITER, 2017). *KRITISCHE ROHSTOFFE GEMÄß DER 4. AKTUALISIERUNG DER LISTE DER KRITISCHEN ROHSTOFFE DER EU (EU-KOMMISSION, 2020A). AEL = ALKALISCHE ELEKTROLYSE, PEMEL = PROTONEN-AUSTAUSCH-MEMBRAN-ELEKTROLYSE, SOEL FESTOXID-ELEKTROLYSE.....	106
<b>TABELLE 4.7:</b> BEDARF DER POTENZIELL KRITISCHEN ROHSTOFFE IRIDIUM UND SCANDIUM IN DEN ELEKTROLYSEURTECHNOLOGIEN PEMEL UND SOEL FÜR DIE FÄLLE 1 (MIT VOLLASTSTUNDEN NACH HERSTELLERANGABEN; S. TAB. 4.3) UND 2 (MIT VOLLASTSTUNDEN NACH ANNAHME DER BUNDESREGIERUNG; 4.000 H) FÜR DIE WASSERSTOFFPRODUKTION FÜR DEN STOFFLICHEN EINSATZ IN DER STAHLPRODUKTION IM JAHR 2030 IN DEUTSCHLAND (EB 1; CA. 4,2 GW), FÜR DIE ZIELKAPAZITÄT DER BUNDESREGIERUNG (2022) FÜR DAS JAHR 2030 (EB 2; 10 GW) UND FÜR DEN MAXIMALEN WASSERSTOFFBEDARF IM JAHR 2030 IN DEUTSCHLAND (ACATECH UND DECHEMA, 2022) (EB 3; 89,3 GW) IM VERGLEICH ZUR MATERIALFÖRDERUNG IM JAHR 2018 (*NACH MARSCHIEDER-WEIDEMANN ET AL., 2021). EB = EINSATZBEREICH.....	107

<b>TABELLE 4.8:</b> SENSITIVITÄTSANALYSE: MARKTVERTEILUNG DER ELEKTROLYSEURTECHNOLOGIEN FÜR DAS JAHR 2030 IN DEUTSCHLAND (NACH IEA, 2022A; SIEMENS ENERGY, 2019; SUNFIRE GMBH, 2021, 2022; ENAPTER, 2023). .....	108
<b>TABELLE 4.9:</b> SENSITIVITÄTSANALYSE: TECHNISCHE DATEN DER ELEKTROLYSEURMODELLE INKL. DER AEMEL VON ENAPTER (SIEMENS ENERGY 2019, 2021; SUNFIRE GMBH, 2021, 2021A, 2022; ENAPTER 2023). DIE BLAU UND KURSIV GESCHRIEBENEN ZAHLEN SIND ANGABEN DER HERSTELLER, DIE SCHWARZ GESCHRIEBENEN WURDEN SELBST BERECHNET. ....	108
<b>TABELLE 4.10:</b> SENSITIVITÄTSANALYSE: BERECHNUNG DER NOTWENDIGEN ELEKTROLYSEKAPAZITÄTEN IM GRUNDSZENARIO-EB 1 IN FALL 1 UND FALL 2 FÜR DIE WASSERSTOFFPRODUKTION FÜR DIE STOFFLICHE NUTZUNG IN DER STAHLPRODUKTION IM JAHR 2030 IN DEUTSCHLAND AUF BASIS DER ANGEPASSTEN MARKTVERTEILUNG NACH IEA (2022A) (SUNFIRE GMBH, 2021, 2021A, 2022; SIEMENS ENERGY, 2019, 2021; ENAPTER, 2023). ....	109
<b>TABELLE 4.11:</b> SENSITIVITÄTSANALYSE: BEDARF DER POTENZIELL KRITISCHEN ROHSTOFFE IRIDIUM UND SCANDIUM IN DEN ELEKTROLYSEURTECHNOLOGIEN PEMEL UND SOEL FÜR DEN FALL 1 (MIT VOLLASTSTUNDEN NACH HERSTELLERANGABEN; S. TAB. 4.3) UND FALL 2 (MIT VOLLASTSTUNDEN NACH ANNAHME DER BUNDESREGIERUNG; 4.000 H) FÜR DIE WASSERSTOFFPRODUKTION FÜR DEN STOFFLICHEN EINSATZ IN DER STAHLPRODUKTION IM JAHR 2030 IN DEUTSCHLAND (EB 1, CA. 4,2 GW), FÜR DIE ZIELKAPAZITÄT DER BUNDESREGIERUNG (2022) FÜR DAS JAHR 2030 (EB 2, 10 GW) UND FÜR DEN MAXIMALEN WASSERSTOFFBEDARF IM JAHR 2030 IN DEUTSCHLAND (ACATECH UND DECHEMA, 2022) (EB 3, 89,3 GW) IM VERGLEICH ZUR MATERIALFÖRDERUNG IM JAHR 2018 (*NACH MARSCHIEDER-WEIDEMANN ET AL., 2021). EB=EINSATZBEREICH. ....	109
<b>TABELLE 5.1:</b> BERECHNUNG DES ENERGIEBEDARFS JE ELEKTROLYSEURTECHNOLOGIE FÜR DIE WASSERSTOFFPRODUKTION FÜR DIE STOFFLICHE NUTZUNG IN DER STAHLPRODUKTION IM JAHR 2030 IN DEUTSCHLAND (S. KAP. 4).....	123
<b>TABELLE 5.2:</b> FÜR DIE STUDIE HERANGEZOGENE WINDKRAFTANLAGEN. ....	124
<b>TABELLE 5.3:</b> ANNAHMEÜBERSICHT FÜR DIE BERECHNUNG DES BEDARFS AN KRITISCHEN ROHSTOFFEN UND ENERGIE.....	124
<b>TABELLE 5.4:</b> DURCHSCHNITTLICHER ZUWACHS AN INSTALLIERTER LEISTUNG PRO TAG IM JEWEILIGEN JAHR (NACH BUNDESNETZAGENTUR, 2022). ....	125
<b>TABELLE 5.5:</b> INSTALLIERTE LEISTUNG (MW) UND REALISIERTE ERZEUGUNG (MWH) IN DEN JAHREN 2015 BIS 2021 (BUNDESNETZAGENTUR, 2022). BERECHNUNG DER VOLLASTSTUNDEN UND DES NUTZUNGSGRADS (NACH BUNDESNETZAGENTUR, 2022). MODELLIERUNG DER BENÖTIGTEN INSTALLIERTEN LEISTUNG (MW), DER ERZEUGUNG (MWH) FÜR DAS JAHR 2030 BASIEREND AUF DEM JEWEILIGEN BEZUGSJAHR MIT DIFFERENZ (MWH) ZUR BENÖTIGTEN ENERGIE FÜR DIE ELEKTROLYSEURE UND DEM NUTZUNGSGRAD DER ANLAGEN. ....	126
<b>TABELLE 5.6:</b> KALKULIERTE DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSPERIODEN JE BEZUGSJAHR. ....	127
<b>TABELLE 5.7:</b> QUARTILE DER DEFIZIT- UND ÜBERSCHUSSPERIODEN ÜBER DIE MODELLIERTEN JAHRE HINWEG. ....	128
<b>TABELLE 5.8:</b> BEDARF POTENZIELL KRITISCHER ROHSTOFFE IM JAHR 2030 FÜR WINDKRAFTANLAGEN IN T/GW (NACH MARSCHIEDER-WEIDEMANN ET AL., 2021 AUS CARRARA ET AL., 2020). BETRACHTETE ANTRIEBSTECHNOLOGIEN: FÜR ONSHORE: GB-PMSG: GEARBOX, PERMANENTMAGNETISCH ERREGT, SYNCHROGENERATOR; DD-EESG: DIRECT DRIVE, ELEKTRISCH ERREGT, SYNCHROGENERATOR; FÜR OFFSHORE: DD-PMSG: DIRECT DRIVE, PERMANENTMAGNETISCH ERREGT, SYNCHROGENERATOR; AN LAND UND SEE EINSETZBAR: GB-DFIG: DOPPELGESPEISTE ASYNCHRONMASCHINE, ELEKTRISCH ERREGT (MARSCHIEDER-WEIDEMANN ET AL., 2021). ....	129
<b>TABELLE 5.9:</b> BEDARF DER SELTENE ERDEN ELEMENTE NEODYM, PRASEODYM, DYSPROSIUM UND TERBIUM IN WINDKRAFTANLAGEN FÜR DIE PRODUKTION VON ENERGIE FÜR DIE ELEKTROLYSEURE ZUR PRODUKTION VON WASSERSTOFF ZUR STOFFLICHEN NUTZUNG IN DER STAHLPRODUKTION IM JAHR 2030 IN DEUTSCHLAND. ....	131
<b>TABELLE 7.1:</b> FRAGEN DER EINZELNEN THEMENFELDER IN TEIL 2 DER LEITFADENINTERVIEWS NACH EXPERTENKATEGORIE. ....	143
<b>TABELLE 7.2:</b> LISTE DER POTENZIELLEN BATTERIEZELLENPRODUKTIONSSTANDORTE IN EUROPA.....	147
<b>TABELLE 7.3:</b> ÜBERSICHT DER ABNAHMEVEREINBARUNGEN FÜR EUROPÄISCHES LITHIUM (NACH SAVANNAH RESOURCES PLC, 2021A; INFINITY LITHIUM, 2022; VULCAN ENERGY RESOURCES, 2021A, B, C, D, 2022C). ....	152

**TABELLE 7.4:** ÜBERSICHT ABNAHMEVERTRÄGE DER VULCAN ENERGIE RESSOURCEN GMBH (NACH VER, 2021A, B, C, D, 2022C). ..... 153

**TABELLE 7.5:** KALKULIERTER LITHIUMBEDARF AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030 IM GRUNDFALL. GRÜN HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, BEI DENEN DIE GERINGSTEN MENGEN AUF DEM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT NACHGEFRAGT WERDEN MÜSSEN, GRAU HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, DIE DIE HÖCHSTEN MENGEN ERFORDERN. .... 154

**TABELLE 7.6:** KALKULIERTER LITHIUMBEDARF AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030 IM PRAXISFALL. GRÜN HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, BEI DENEN DIE GERINGSTEN MENGEN AUF DEM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT NACHGEFRAGT WERDEN MÜSSEN, GRAU HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, DIE DIE HÖCHSTEN MENGEN ERFORDERN. .... 155

**TABELLE 7.7:** KALKULIERTER LITHIUMBEDARF AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030 IM GRUNDFALL DER SENSITIVITÄT 1. GRÜN HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, BEI DENEN DIE GERINGSTEN MENGEN AUF DEM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT NACHGEFRAGT WERDEN MÜSSEN, GRAU HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, DIE DIE HÖCHSTEN MENGEN ERFORDERN..... 156

**TABELLE 7.8:** KALKULIERTER LITHIUMBEDARF AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030 IM PRAXISFALL DER SENSITIVITÄT 1. GRÜN HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, BEI DENEN DIE GERINGSTEN MENGEN AUF DEM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT NACHGEFRAGT WERDEN MÜSSEN, GRAU HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, DIE DIE HÖCHSTEN MENGEN ERFORDERN..... 157

**TABELLE 7.9:** KALKULIERTER LITHIUMBEDARF AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030 IM GRUNDFALL DER SENSITIVITÄT 2. GRÜN HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, BEI DENEN DIE GERINGSTEN MENGEN AUF DEM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT NACHGEFRAGT WERDEN MÜSSEN, GRAU HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, DIE DIE HÖCHSTEN MENGEN ERFORDERN..... 158

**TABELLE 7.10:** KALKULIERTER LITHIUMBEDARF AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030 IM PRAXISFALL DER SENSITIVITÄT 2. GRÜN HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, BEI DENEN DIE GERINGSTEN MENGEN AUF DEM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT NACHGEFRAGT WERDEN MÜSSEN, GRAU HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, DIE DIE HÖCHSTEN MENGEN ERFORDERN..... 159

**TABELLE 7.11:** KALKULIERTER LITHIUMBEDARF AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030 IM GRUNDFALL DER SENSITIVITÄT 3. GRÜN HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, BEI DENEN DIE GERINGSTEN MENGEN AUF DEM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT NACHGEFRAGT WERDEN MÜSSEN, GRAU HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, DIE DIE HÖCHSTEN MENGEN ERFORDERN..... 160

**TABELLE 7.12:** KALKULIERTER LITHIUMBEDARF AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030 IM PRAXISFALL DER SENSITIVITÄT 3. GRÜN HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, BEI DENEN DIE GERINGSTEN MENGEN AUF DEM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT NACHGEFRAGT WERDEN MÜSSEN, GRAU HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, DIE DIE HÖCHSTEN MENGEN ERFORDERN..... 161

**TABELLE 7.13:** KALKULIERTER LITHIUMBEDARF AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030 IM PRAXISFALL DER SENSITIVITÄT 3. GRÜN HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, BEI DENEN DIE GERINGSTEN MENGEN AUF DEM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT NACHGEFRAGT WERDEN MÜSSEN, GRAU HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, DIE DIE HÖCHSTEN MENGEN ERFORDERN..... 162

**TABELLE 7.14:** KALKULIERTER LITHIUMBEDARF AM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT FÜR DIE BATTERIEZELLENPRODUKTION IN DEUTSCHLAND IM JAHR 2030 IM PRAXISFALL DER SENSITIVITÄT 3. GRÜN HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, BEI DENEN DIE GERINGSTEN MENGEN AUF DEM AUßEREUROPÄISCHEN MARKT NACHGEFRAGT WERDEN MÜSSEN, GRAU HINTERLEGT SIND DIE SZENARIEN, DIE DIE HÖCHSTEN MENGEN ERFORDERN..... 163

**TABELLE 7.15:** ÜBERSICHT DER KLIMA-, ENERGIE- UND INDUSTRIEZIELE IN DEUTSCHLAND STAND 2019 VS. SOLL 2030 MIT DEM VERGLEICH DER GESETZESÄNDERUNGEN AUS DEM ENERGIESOFORTMAßNAHMENPAKET VOM 06.04.2022 UND DER BEKANNTMACHUNG ZUM AUSBAU DER ELEKTROLYSEKAPAZITÄTEN VOM JUNI 2022

(BMWK, 2022, A, B; BUNDESREGIERUNG, 2022; PERS. COM. ACATECH, 2022; DESTATIS, 2022A; KSG, 2021; BUNDESREGIERUNG, 2020; BUNDESREGIERUNG, 2019; EEG, 2021; BUNDESREGIERUNG, 2020A; BUNDESREGIERUNG, 2022). \*STAND OKTOBER 2022. .... 166

## Erklärung zur Originalität

Kapitel 2: Das Manuskript „Herausforderungen bei der Rohstoffversorgung für Deutschland – eine holistische Betrachtung durch Experteninterviews“ wurde von Katharina Steiger als Erstautorin vollständig eigenständig geschrieben mit Anregungen von Prof. Dr. Christoph Hilgers und Prof. Dr. Jochen Kolb als Co-Autoren. Die Experteninterviews wurden von Katharina Steiger eigenständig geplant, vorbereitet, angefragt, aufgesetzt, durchgeführt und ausgewertet.

Kapitel 3: Das Manuskript „Lithiumbedarf für die Batteriezellenfertigung in Deutschland und Europa im Jahr 2030“ wurde von Katharina Steiger als Erstautorin vollständig eigenständig geschrieben mit Anregungen von Prof. Dr. Christoph Hilgers und Prof. Dr. Jochen Kolb als Co-Autoren. Das Fallbeispiel mit den Szenarien- und Sensitivitätsanalysen inklusive aller Berechnungen wurde von Katharina Steiger eigenständig konzipiert und durchgeführt.

Kapitel 4: Das Manuskript „Iridium- und Scandiumbedarf für die Erzeugung von Elektrolyse-Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Stahlproduktion 2030 in Deutschland“ wurde von Katharina Steiger als Erstautorin vollständig eigenständig geschrieben mit Anregungen von Prof. Dr. Christoph Hilgers und Prof. Dr. Jochen Kolb als Co-Autoren. Das Fallbeispiel und alle dazu gehörenden Berechnungen wurden von Katharina Steiger eigenständig konzipiert und durchgeführt.

Kapitel 5: Das Manuskript „Bedarf Seltene Erden Elemente (Ny, Pr, Dy, Tb) für Windkraftanlagen zur Energiegewinnung für die Herstellung von Elektrolyse-Wasserstoff im Jahr 2030 in Deutschland“ wurde von Katharina Steiger als Erstautorin vollständig eigenständig geschrieben mit Anregungen von Prof. Dr. Christoph Hilgers und Prof. Dr. Jochen Kolb als Co-Autoren. Das Fallbeispiel, alle Modellierungen und alle dazu gehörenden Berechnungen wurden von Katharina Steiger eigenständig konzipiert und durchgeführt.

# 1. Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Dreißig Jahre bevor die erste Weltklimakonferenz in Genf abgehalten wurde, hatte Deutschland im Jahr 1949 den ersten im weiteren Sinne Naturschutz in Art. 74 Nr. 15, 17 und Art. 75 Nr. 3 des Grundgesetzes festgehalten, genauso wie das Recht der Wirtschaft in Art. 74 Nr. 11 GG. Heute werden beide Bereiche, erweitert um den Klimaschutz, von diversen nationalen Gesetzen geregelt und vom EU-Recht durch Richtlinien und Verordnungen (beispielsweise RL 92/43/EWG (FFH-RL) oder VO 2021/1119 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität) teilweise gelenkt. Die Zusagen zu internationalen Abkommen wie beispielsweise dem Kyoto-Protokoll (UNFCCC, 1997) oder dem Pariser Klimaabkommen (UNFCCC, 2015) stellen einen weiteren Eckpfeiler dar, der den Handlungsspielraum für die Politik und Wirtschaft, auch in Bezug auf die Rohstoffversorgung in Deutschland, vorgibt.

Deutschland kann sich zum größten Teil mit Steine- und Erden-Rohstoffen aus heimischen Lagerstätten selbst versorgen (BGR, 2022). Im Jahr 2021 wurden 309 Mio. t Sand und Kies in Deutschland gefördert, ca. 22 % mehr als zehn Jahre zuvor (BGR; 2022, DERA, 2012). Bei Metallen, Energierohstoffen und manchen Industriemineralen besteht eine hohe Importabhängigkeit (BGR, 2022), da u. a. der Bergbau von Blei, Kupfer, Nickel, Kobalt, Uran, Wismut, Zink und Zinn im vergangenen Jahrhundert in Deutschland eingestellt wurde. Die Förderung der Kohlenwasserstoffe Braunkohle, Steinkohle, Erdöl und Erdgas, die etwa 76 % des Primärenergieverbrauchs im Jahr 2020 in Deutschland ausmachten (BMWK, 2022), nimmt gesetzes- und akzeptanzbedingt stetig ab. Im Jahr 2011 wurden in Deutschland noch 13 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas und Erdöl gefördert, im Jahr 2021 noch 6 Mrd. m<sup>3</sup> (BGR, 2022).

Recycling kann bei Stahl zu ca. 43 % (Stand 2019, WV Stahl, 2020), bei Aluminium zu ca. 53 % (Stand 2021, BGR, 2022), bei Kupfer zu ca. 44 % (Stand 2020, BRG, 2021) und bei Zink zu ca. 18 % (Stand 2021, BGR, 2022) zur Bedarfsdeckung in Deutschland beitragen, jedoch (noch) nicht bei potenziell kritischen Rohstoffen, die für die technologischen Wenden besonders notwendig sind (z. B. Baum et al., 2022). Daher ist es essenziell, die Kreislaufwirtschaft für die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen – wo technisch, ökonomisch und ökologisch möglich (Schäfer und Schmidt, 2020) – noch nachhaltig auszubauen.

Die Wirtschaft und Gesellschaft benötigen Rohstoffe, um auf dem Entwicklungsstandard zu leben, der die letzten Jahrzehnte geschaffen wurde (vgl. BMWi, 2021). Auch die alternativen Technologien, welche die fossilen Energieträger in den Bereichen Industrie, Verkehr und Wärme ersetzen sollen, benötigen Rohstoffe, um erbaut und genutzt werden zu können (vgl. Marscheider-Weidemann et al., 2021). Darunter auch potenziell kritische Rohstoffe, welche aufgrund von Faktoren wie den Explorations- und Abbaumöglichkeiten, der sozioökonomischen Situation in den Abbau- und Weiterverarbeitungsländern und der Nachfrage auf dem globalen Markt als potenziell kritisch bezeichnet werden (vgl. DERA, 2021).

Ereignisse wie die COVID-19-Pandemie oder der Ausbruch des Kriegs Russlands gegen die Ukraine in unmittelbarer europäischer Nähe haben deutlich aufgezeigt, wie abhängig Deutschland von internationalen Rohstoffwertschöpfungsketten ist (vgl. BDI, 2020; BP, 2021; acatech und DECHEMA, 2022). Es ist ein Balanceakt für den Wirtschaftsstandort Deutschland, ökologische, ökonomische und soziale Belange gleichgewichtet zu behandeln und erfolgreich voranzutreiben, sodass Naturgüter, die die Grundlage für Lebensräume darstellen, erhalten und geschützt werden und gleichzeitig die Gesellschaft sich auf einem technologisch hohen und international konkurrenzfähigen Niveau weiterentwickeln kann. Der Einsatz von Rohstoffen ist im gegenwärtigen Wirtschaftssystem unabdingbar. Deutschland wird ohne weitere Maßnahmen zur Rohstoffbeschaffung und -sicherung, ob bei einem fossilen Pfad (O'Neill et al., 2017) oder einem Pfad entsprechend den Klima- und Energiezielen der EU und der Bundesregierung, abhängig vom internationalen Markt sein.

## **1.2 Ziel und Zweck**

Die vorliegende Dissertation verfolgt einen deduktiven, linearen Ansatz und geht zur Erfassung der gegenwärtigen und der Beschreibung einer möglichen zukünftigen Rohstoffversorgungssituation in Deutschland im Jahr 2030 von der allgemeinen Betrachtung über industriebezogene Fallbeispiele auf den möglichen Bedarf einzelner potenziell kritischer Rohstoffe ein.

Die Arbeit geht dementsprechend zuerst der Frage nach, ob es und wenn ja, welche Herausforderungen es bei der Rohstoffversorgung und -sicherung aktuell (im Jahr 2021) in Deutschland gibt. Dabei werden die Antworten von Experten, die mittels Experteninterviews erfasst wurden, erörtert, die Vielfalt der Herausforderungen in Deutschland aufgedeckt und folglich eine holistische Bestandsaufnahme dargelegt.

Durch die Kalkulation von Rohstoff- und Energiebedarfen in Fallbeispielen für das Jahr 2030 in Deutschland und Europa wird ein Erkenntnisgewinn für die zukünftige Rohstoffversorgungssituation für den deutschen Markt generiert. Dabei liegt der Fokus auf den Metallen Lithium, Iridium, Scandium und vier der Seltene Erden Elemente (Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium), welche alle in den heute als Zukunftstechnologien bezeichneten Technologien verbaut werden. Mit der Betrachtung vom Minenursprung bis zum verarbeiteten Rohstoff erlaubt die Arbeit Aussagen über Zusammenhänge in verschiedenen Wertschöpfungsketten zu treffen und die bestehende und fortwährende Abhängigkeit vom internationalen Markt aufzuzeigen.

Methodisch stellt die Arbeit durch die Kombination aus Experteninterviews und der Aufstellung und Berechnung von industriebezogenen Fallbeispielen eine interdisziplinäre Betrachtung der Rohstoffversorgung und deren Möglichkeiten der heimischen Förderung, des Recyclings und des Imports nach Deutschland dar. Die vorliegende Dissertation generiert einen Mehrwert für politische wie auch wirtschaftliche Planungsinstanzen und ist motiviert durch die Komplexität der zusammenhängenden Klima-, Rohstoff- und Energiethemen, die es faktenbasiert zu erläutern gilt.

## 1.3 Überblick der Arbeit

### 1.3.1 Herausforderungen bei der Rohstoffversorgung für Deutschland – eine holistische Betrachtung durch Experteninterviews (Kapitel 2)

Deutschland sichert seine Nachfrage nach Industriemineralen, metallischen Rohstoffen und Energierohstoffen vornehmlich durch Importe. Weder durch die heimische Produktion noch die inländische Kreislaufwirtschaft kann diese gedeckt werden. Andere Industrienationen wie China, Japan oder Südkorea haben offensivere Strategien, um die benötigten Rohstoffe zu sichern. Es stellt sich daher die Frage, wie Deutschland aufgestellt ist und ob es bei der Rohstoffversorgung, der Beschaffung und Sicherung von Rohstoffen für Deutschland Herausforderungen gibt, und wenn, welche. Experteninterviews geben über den aktuellen Stand in Deutschland im Jahr 2021 Aufschluss.

In Kapitel 2 werden Expertenkategorien definiert, für welche verschiedene Experten angefragt werden. Für jede Expertenkatgorie werden Leitfäden für die Interviews konzipiert. 34 Experten entlang der Rohstoffwertschöpfungskette, d. h. aus Unternehmen der Exploration und Produktion sowie der Rohstoffverarbeitung, aus Industrie- und Naturschutzverbänden, Wissenschaft, Behörden und Ministerien werden befragt. Im Anschluss werden die Interviews transkribiert und nach definierten Bewertungskriterien ausgewertet sowie analysiert. Die Methode der qualitativen Inhaltsanalyse ermöglicht, die Standpunkte verschiedener Akteure deutlich zu machen und einen holistischen Überblick über die aktuelle Lage in Deutschland, auch im internationalen Kontext, darzulegen. Abschließend werden Maßnahmen für alle beteiligten Akteure zur Linderung der Herausforderungen aus der Studie abgeleitet.

### 1.3.2 Lithiumbedarf für die Batteriezellenfertigung in Deutschland und Europa im Jahr 2030 (Kapitel 3)

Der führende Energiespeicher für die Elektromobilität ist bis auf Weiteres die Lithium-Ionen-Batterie (LIB). Diese soll in den kommenden Jahren in Deutschland und anderen europäischen Ländern produziert werden. Für die Herstellung der Elektroden in einer LIB sind neben Lithium diverse potenziell kritische Rohstoffe wie Nickel, Kobalt oder Mangan notwendig. Keines der Metalle wird derzeit in Deutschland gefördert. Die Gewinnung von Lithium aus Lagerstätten der EU-27 wird in verschiedenen Projekten angestrebt, die zusammengefasst 133,6 kt LCE ab dem Jahr 2026 bereitstellen wollen. Recycling könnte nach DERA-Prognosen zwischen 2,5 % und 10,6 % des Bedarfs an Lithium im Jahr 2030 in Europa decken.

In Kapitel 3 wird ein Fallbeispiel zum Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion 2030 in Deutschland und Europa entwickelt. Mittels einer Szenarioanalyse wird die Höhe eines möglichen europäischen Primär- und Sekundärlithiumangebots sowie des Lithiumbedarfs (in t Lithiumkarbonatäquivalent, engl. LCE) am außereuropäischen Markt für die Kathoden für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 ermittelt. Dafür werden Recherchen ausgewertet und eine Nachfrage-Angebotsgleichung aufgestellt. Mittels einer Sensitivitätsanalyse

wird die Auswirkung der Veränderung einzelner Komponenten der Gleichung auf das Ergebnis überprüft. Abschließend werden die Ergebnisse der Szenarioanalyse diskutiert.

### **1.3.3 Iridium- und Scandiumbedarf für die Erzeugung von Elektrolyse-Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Stahlproduktion 2030 in Deutschland (Kapitel 4)**

Mit dem Ziel der Klimaneutralität ab dem Jahr 2045 in Deutschland (KSG 2021) wird die Reduktion der Treibhausgasemissionen sowie der Ausbau von Erneuerbaren Energien angestrebt. Stahl, welcher u. a. für den Bau von Energieanlagen eingesetzt wird, verursacht bei seiner Herstellung ca. 5,8 % des gesamten deutschen THG-Ausstoßes (Stand 2020; DESTATIS, 2022e). Der stoffliche und energetische Einsatz von Wasserstoff stellt eine Möglichkeit dar, die Stahlindustrie in Deutschland betriebsfähig und nachhaltig zu erhalten. Für die Erzeugung von Wasserstoff kann auf den Einsatz von potenziell kritischen Rohstoffen nicht verzichtet werden.

In Kapitel 4 wird ein Fallbeispiel entwickelt, das zunächst die Elektrolysekapazitäten zur Wasserstoffherzeugung für die stoffliche Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland (Einsatzbereich 1) ermittelt. Darauf aufbauend wird der Bedarf der Metalle Iridium für die Errichtung der zu installierenden Protonen-Austausch-Membran-Elektrolysekapazitäten und Scandium für die zu installierenden Festoxid-Elektrolysekapazität berechnet. Vergleichend wird der Bedarf an Iridium- und Scandium für die von der Regierung angestrebten Elektrolysekapazitäten von 10 GW im Jahr 2030 (Einsatzbereich 2) und des gesamten Wasserstoffbedarfs Deutschlands im Jahr 2030 (Einsatzbereich 3) kalkuliert.

### **1.3.4 Bedarf Seltene Erden Elemente (Ny, Pr, Dy, Tb) für Windkraftanlagen zur Energiegewinnung für die Herstellung von Elektrolyse-Wasserstoff im Jahr 2030 in Deutschland (Kapitel 5)**

Grüner Wasserstoff wird gemäß den gesetzlichen Vorgaben (vgl. § 93 EEG 2023; § 3 Nr. 21, 27a EEG 2023) aus der Wasserelektrolyse durch Erneuerbare Energie erzeugt. Für die Errichtung von Erneuerbare-Energie-Anlagen werden u. a. auch potenziell kritische Rohstoffe benötigt. So werden in den Permanentmagneten, welche in den Turbinen von Windkraftanlagen zum Einsatz kommen, die Metalle Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium (den Seltene Erden Elementen zugehörig) verbaut.

Kapitel 5 zieht das in Kapitel 4 konzipierte und diskutierte Fallbeispiel heran und kalkuliert den Energiebedarf der Elektrolyseure basierend auf den ermittelten Elektrolysekapazitäten zur Wasserstoffherzeugung für die stoffliche Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland. Die Energie wird in diesem Fallbeispiel rein aus Windkraft erzeugt. Der Energiebedarf liefert gemeinsam mit der tatsächlich installierten Windleistung und -erzeugung der Jahre 2015 bis 2021 die Inputparameter für die Modellierung der zu installierenden Windkraft für das Fallbeispiel. Für dieses wird abschließend der Bedarf der Seltene Erden Elemente Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium berechnet.

## 1.4 Veröffentlichte Teile dieser Arbeit

### Publikationen

Steiger, K., Hilgers, C., Kolb, J. (Eds.) (2022): Lithium in Europa. Hrsg. THINKTANK für Industrielle Ressourcenstrategien. 101 S. Karlsruhe. DOI: 10.5445/IR/1000154047.

Steiger, K., Hilgers, C., Kolb, J. (2022): Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030. SRG Working Paper 3. 65 S., Karlsruhe. DOI: 10.5445/IR/1000153059.

Steiger, K., Hilgers, C., Kolb, J. (2022): Herausforderungen bei der Rohstoffversorgung für Deutschland: eine holistische Betrachtung durch Experteninterviews. SRG Working Paper 2. 63 S., Karlsruhe. DOI: 10.5445/IR/1000152882.

Steiger, K., Hilgers, C., Kolb, J. (2022): Factsheet – Herausforderungen bei der Rohstoffversorgung für Deutschland – eine holistische Betrachtung durch Experteninterviews. Notwendigkeit einer resilienten Rohstoffversorgung – Vol. 2, 17 S., Karlsruhe.

Steiger, K., Hilgers, C., Kolb, J. (2021): Mining – smelting – recycling, is the German demand and supply of raw materials resilient? SGA News 49, 1–5.

### Konferenzbeiträge

Steiger, K., Hilgers, C., Kolb, J. (2022): Herausforderungen bei der Rohstoffversorgung für Deutschland – eine holistische Betrachtung durch Experteninterviews. GDMB Konferenz, Celle.

Steiger, K., Hilgers, C., Kolb, J. (2021): Hydrogen for the steel production 2030 – A pilot study about the raw material demand for the hydrogen production. GeoKarlsruhe, Karlsruhe.

Steiger, K., Hilgers, C., Kolb, J. (2021): Wasserstoff im Metallsektor – eine Pilotstudie zu Mengen und Raten. GDMB Konferenz, virtuell.

## **2. Herausforderungen bei der Rohstoffversorgung für Deutschland – eine holistische Betrachtung durch Experteninterviews**

### **2.1 Zusammenfassung**

Die Industrie in Europa und insbesondere in Deutschland ist auf den Import von Kohlenwasserstoffen als Energieträger und Rohstoff, Industriemineralen, metallischen Rohstoffen sowie Halberzeugnissen angewiesen. Der Bedarf kann, bis auf wenige Ausnahmen, weder durch heimische Produktion noch durch inländische Kreislaufwirtschaft gedeckt werden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, welche Herausforderungen es bei der Rohstoffversorgung für den Wirtschaftsstandort Deutschland gibt. Des Weiteren ist von Interesse, wie die Stellung Deutschlands im internationalen Vergleich wahrgenommen wird. Mittels Experteninterviews wurden 34 Experten aus Unternehmen der Exploration und Produktion sowie der Rohstoffverarbeitung, aus Industrie- und Naturschutzverbänden, Wissenschaft, Landesbergbehörden und Ministerien zu ihrer Sicht befragt. Die Studie gibt ein Stimmungsbild aus dem Jahr 2021 wieder, das bereits von der COVID-19-Pandemie geprägt war, jedoch nicht in Betracht zog, dass ein Krieg in Europa die Rohstoffversorgung für Deutschland nochmals beeinträchtigen könnte.

Neben 28 Herausforderungen, denen die Experten in ihrem jeweiligen Tätigkeitsbereich in Bezug auf die Rohstoffversorgung begegnen, äußern sie sich ebenso zur Rolle des Staates und definieren Forderungen an diesen. Auch wenn Rohstoffförderpotenziale in Deutschland vorhanden sind, schätzen einige Experten u. a. aufgrund der immer weiter sinkenden Akzeptanz in der Bevölkerung die Lage für die heimische Förderung als eher pessimistisch und die Bergbaubranche als Auslaufmodell ein. Außerdem wird die differenzierte Position Deutschlands bei der Rohstoffversorgung im internationalen Vergleich zu weiteren führenden Industrienationen als beunruhigend angesehen. Als besonders hinderlich erachten die Experten die Dauer der Genehmigungsverfahren für Rohstoffförderprojekte, den Fachkräftemangel und die Interessenskonflikte verschiedener Akteure. Jedoch werden das vorhandene Fachwissen sowie technische Innovationen als Maßnahmen zur Weiterentwicklung und Erhalt der Branche und folglich als Basis einer resilienten Rohstoffversorgung für die deutsche Industrie gesehen. In Bezug auf die Rolle des Staates sprechen die Experten sich für mehr staatliche Unterstützung bei der heimischen Rohstoffförderung, bei Auslandstätigkeiten von deutschen Unternehmen, wie auch für eine stärkere Einbindung des Themas in die Außen- wie Innenpolitik aus.

## 2.2 Einführung

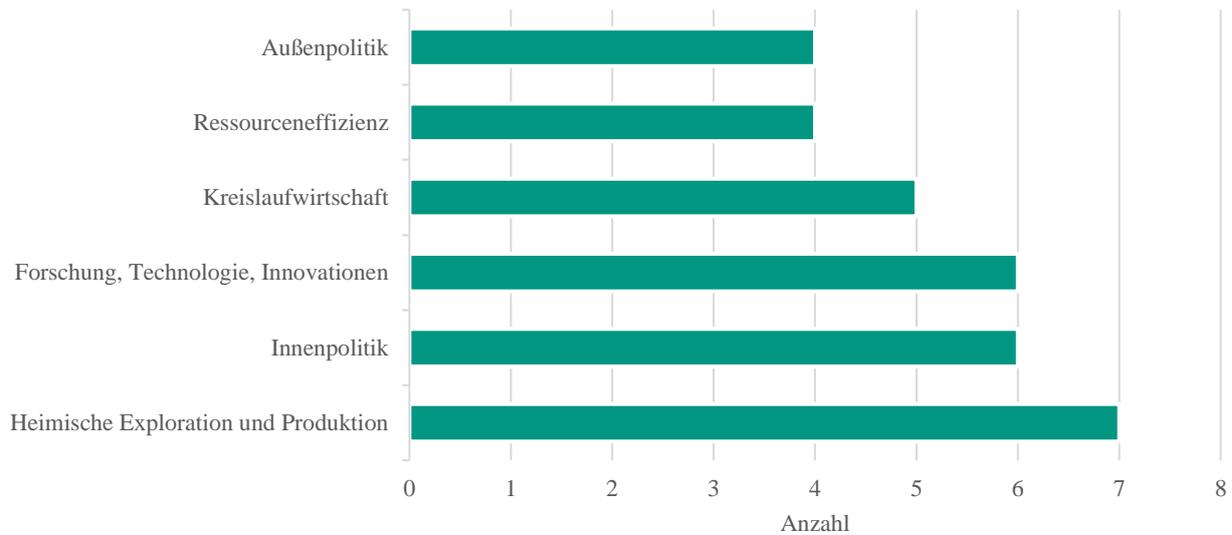
Befragungen von deutschen Unternehmen zu Rohstoffthemen werden durch verschiedene Institutionen immer wieder durchgeführt. Seit 2010 führt das Beratungsunternehmen Inverto in Kooperation mit dem Handelsblatt jährlich eine Rohstoffstudie mittels Unternehmensbefragungen durch, die den Fokus auf die Herausforderungen des Rohstoffeinkaufs legt (Inverto, 2021). Danach befürchten in Deutschland ansässige Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes, der Baubranche sowie aus dem Handel- und Dienstleistungssektor keine Rohstoffversorgungsengpässe, jedoch die Risiken in der Lieferkette (Inverto, 2020). Die Volatilität der Rohstoffpreise äußerte sich 2021 in überdurchschnittlichen Preissteigerungen, dies wurde 2022 durch den Krieg in der Ukraine nochmals verstärkt (Odrich, 2022). Auch Produktionsstillstände und instabile Lieferketten führten zu Beschaffungsengpässen und nahmen im Endeffekt Einfluss auf das allgemeine Geschäftsergebnis (Inverto, 2021a; Wohlrabe, 2021). Es wird angenommen, dass unter den importierten metallischen Rohstoffen vor allem bei Eisenmetallen und Stahl zukünftig mit Versorgungsengpässen zu rechnen sei (WVMetalle, 2021; Inverto, 2021a). Gegenwärtig bekräftigen die Sanktionen der EU auf Stahlzeugnisse aus der Russischen Föderation diese Aussage (EU-Kommission, 2022). Maßgeblich wurde bisher mit der „Weitergabe der Preissteigerungen an die Kunden“ sowie der „Analyse der Supply Chain“ und der „Optimierung der Lagerbestände“ den Herausforderungen entgegengewirkt (Inverto, 2021a; Maihold und Mühlhoyer, 2021).

Das Institut für Mittelstandsforschung stellte in seiner Unternehmensbefragung aus dem Jahr 2014 die Rohstoffknappheit als eine bekannte und anhaltende Herausforderung für die Wirtschaft fest (Welter et al., 2014). Experteninterviews zu unternehmerischen Rohstoffstrategien zwischen den Jahren 2016 und 2018 kamen zu dem Ergebnis, dass das Thema Rohstoffsicherung in den meisten der befragten Unternehmen verspätet wahr- und ernst genommen wurde, was zu einem erhöhten Versorgungsrisiko führte (Schmid, 2020). Der damals bereits erkannten Abhängigkeit von China wurde von den befragten Unternehmen mit den Maßnahmen „Weitergabe von Preisaufschlägen an die Kunden“, „Lieferantenmanagement“, „Substitution“ und „Lagerhaltung“ begegnet (Schmid, 2020). Auch der Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) führte 2020 eine Unternehmensbefragung zu den „Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf die Rohstoffversorgung“ durch (BDI, 2020). Dabei stellte sich heraus, dass fast 70 % der befragten Unternehmen von mittel- bis langfristigen Störungen in der Rohstoffversorgung ausgehen und die Beschaffung von Eisen und Schrotten maßgeblich beeinträchtigt sei (BDI, 2020). Über die Hälfte der Unternehmen sah eine Steigerung ihrer Lagerhaltung als sinnvolle Maßnahme an und äußerte den Wunsch nach „Steuererleichterungen bei der Lagerhaltung“ (BDI, 2020).

Bei Interviews zur „Konflikthaftigkeit der Rohstoffgewinnung“ heimischer Rohstoffe wurde deutlich, dass verschiedene Interessensvertreter unterschiedliche Positionen und Belange bei der heimischen Rohstoffförderung haben (Weber et al., 2018). Befragte Unternehmen der Exploration und Produktion aus der Gesteinsindustrie in Deutschland nannten als wesentliche Herausforderungen bei der Ausübung ihrer Arbeit die Reduktion der Eingriffe in und Auswirkungen auf die Umwelt, den Umgang mit Bürgerinitiativen, die Vorgaben bei Planungsverfahren sowie ein Wandel in der Politik hin zu einer restriktiven Haltung gegenüber rohstoffgewinnenden Projekten

in der Heimat (Weber et al. 2018). Die Interessen von Bürgerinitiativen gehen bis hin zur Verhinderung von Projekten zur Rohstoffgewinnung, Anwohner sind „skeptisch gegenüber dem Eingriff in die Natur“, Naturschutzverbände verlangen eine Ressourcenschonung und die Politik verlangt nach mehr Einhaltung der Vorschriften in Planungsverfahren seitens der Unternehmen (Weber et al., 2018; Aschenbrand et al., 2017). Für das Deutsche EnergieRohstoff-Zentrum wurde 2014 eine Umfrage in der Bevölkerung zur Haltung bei Energiethemen durchgeführt (Nippa, 2015). Dabei stimmte die Hälfte der 1.001 Befragten zu, dass „die Industrie Voraussetzung für Wachstum und Wohlstand in Deutschland ist“ und 74 % äußerten sich zustimmend zum heimischen Bergbau (Nippa, 2015).

Nicht erst seit die COVID-19-Pandemie aufgezeigt hat, dass die deutsche Wirtschaft durch ihre internationale Importabhängigkeit negativ beeinflusst werden kann, wird auf das Thema Rohstoffverfügbarkeit und -sicherung in Europa hingewiesen (vgl. Clement, 1971). Zu Themen wie beispielsweise Rohstoffstrategien, potenziell kritische Rohstoffe oder dem nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen existieren zahlreiche Studien (vgl. CDU/CSU, 2010; DERA 2021a; IRP, 2020; Wrede, 2020). Neben der Kritikalität einer hundertprozentigen Importabhängigkeit Deutschlands für metallische Rohstoffe und der global steigenden Rohstoffnachfrage, fehlender Substitutionsmöglichkeiten oder vermehrter Wettbewerbsverzerrung auf dem internationalen Rohstoffmarkt u. a. durch das Eingreifen von staatlicher Seite wird eine unzureichende Einbindung der Rohstoffthematik in der Politik aufgezeigt (Bardt, 2008; Bäuerle et al., 2011; Hund et al., 2020; Schwarz, 2012; Hennicke et al., 2010; Kullik, 2020; BDI, 2018a). Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) legt die Notwendigkeit einer sicheren Rohstoffversorgung für eine funktionierende deutsche Industrie dar und weist neben den wirtschaftlichen auch auf die Bedeutung ökologischer sowie politischer Faktoren hin, die eine resiliente Versorgung beeinflussen können (VDI, 2020). Eine strategische Umfeldanalyse resilienter Rohstofflieferketten sollte neben den geologischen Randbedingungen die soziokulturellen, technologischen, ökonomischen, ethischen, politischen, rechtlichen und ökologischen Aspekte berücksichtigen (engl. STEEPLE Analyse, Hilgers et al. 2020, 2021). In diversen Veröffentlichungen wurden bereits Handlungsmaßnahmen vorgeschlagen, die für die Rohstoffversorgung in Deutschland essenziell sind. Aus sieben exemplarisch ausgewählten Publikationen ließen sich sechs spezifische Bereiche definieren, in denen die Handlungsmaßnahmen wirken sollten (Abb. 2.1).



**Abbildung 2.1:** Bereiche für Handlungsmaßnahmen zur Rohstoffversorgung in Deutschland (Bardt, 2008 und 2014; Erdmann und Behrendt, 2011; acatech, 2017; BDI, 2018a; Wedig, 2019 (VRB); GERRI, 2021; Marscheider-Weidemann et al., 2021 (DERA)).

Um die verschiedenen Sichtweisen und Standpunkte unterschiedlicher Interessensvertreter zur Rohstoffbeschaffung und -sicherung für Deutschland übersichtlich darzulegen, wurden 2021 34 Experten aus Unternehmen der Exploration und Produktion, Rohstoffverarbeitung und Rohstoffberatung, Industrie- und Naturschutzverbänden, Wissenschaft, Landesbergbehörden und Ministerien befragt. Im Folgenden wird zunächst die Bedeutung der Rohstoffversorgung in Deutschland aufgezeigt, bevor der Prozessablauf von der Auswahl der Methode Experteninterviews über die Kategorisierung der Experten zur Analyse und Auswertung beschrieben wird. Abschließend wird in den Ergebnissen die Haltung der Experten dargelegt und in der Diskussion die Rolle der heimischen Förderung und der internationalen Konkurrenzfähigkeit für den Wirtschaftsstandort Deutschland beschrieben, bevor auf die Hauptherausforderungen bei der Rohstoffversorgung, die den Experten bei der Ausübung ihrer Arbeit begegnen, eingegangen wird.

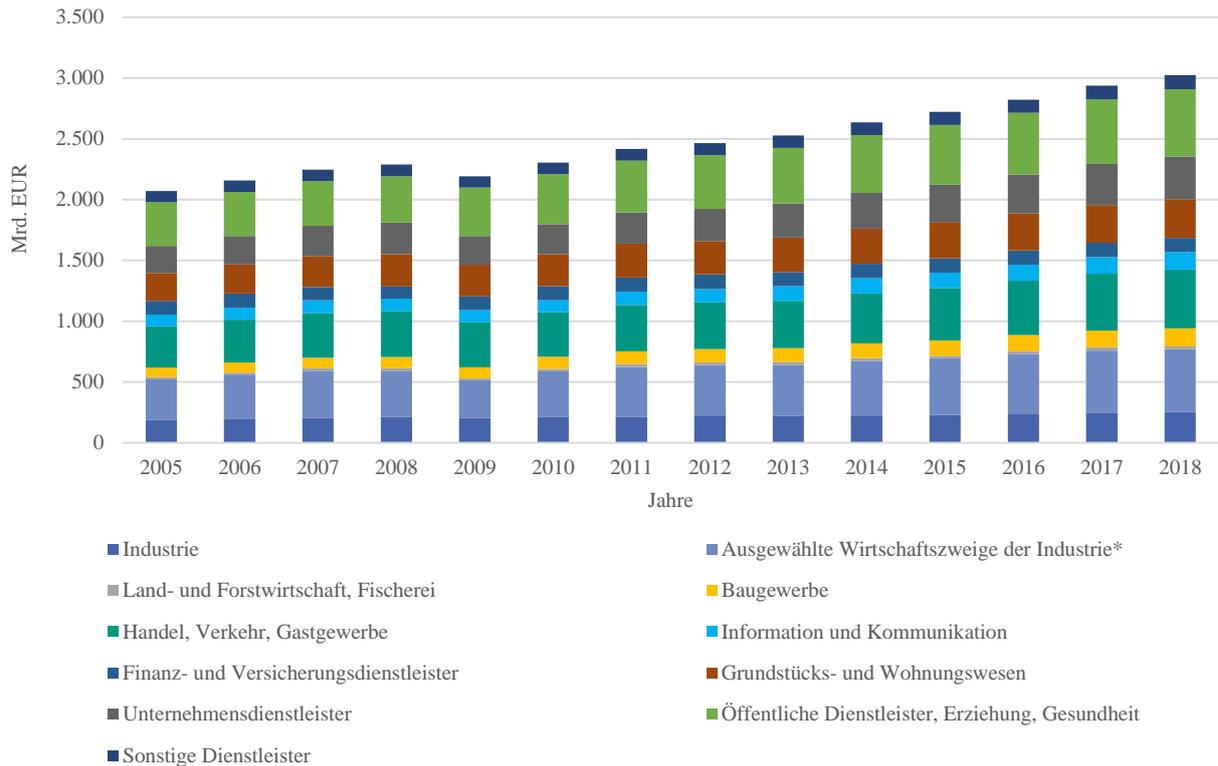
## 2.3 Ausgangslage der Rohstoffversorgung für den Industriestandort Deutschland

Der Bedarf an Rohstoffen wird in Deutschland über drei Säulen bedient: heimische Förderung, Recycling und Importe. Importe sind essenziell, da weder die heimische Förderung noch das Recycling den Bedarf an Industriemineralen, metallischen Rohstoffen und Energierohstoffen decken kann (EU-Kommission, 2020a). Der Import von Rohstoffen, Brennstoffen und Schmiermitteln betrug 2020 insgesamt ca. 99 Mrd. €, was ca. 10 % der Gesamtimporte ausmachte, etwas mehr als die Hälfte davon (ca. 55 Mrd. €) stammten von außerhalb der EU (DESTATIS, 2021a). Im Jahr 2019 wurden ca. 84 Mio. t an Metallen (Eisen und Stahl, metallurgische Erze und Metallabfälle und Nichteisenmetalle) importiert, was einen Rückgang von 8 % zum Vorjahr darstellt, 2020 sanken diese weiter auf ca. 73 Mio. t (DESTATIS, 2021d). Exportiert wurden ca. 41 Mio. t Metalle im Jahr 2019 und ca. 38 Mio. t in 2020 (DESTATIS, 2021d). Auch wenn der Außenhandel mit Metallen in den letzten Jahren abgenommen hat, zeigen Prognosen eine langfristige Steigerung im Bedarf (Marscheider-Weidemann, 2021). Die Liste an Warengruppen mit erhöhten potenziellen Beschaffungsrisiken, zu denen Metalle, Industriemineralien und Handelsprodukte gehören, wurde vom Jahr 2019 auf das Jahr 2021 um sieben auf 133 erweitert (DERA, 2019; DERA, 2021). Von der deutschen Wertschöpfung basieren 17 % (ca. 463 Mrd. €, Stand 2015) auf internationalen Wertschöpfungsketten (Flach et al., 2020; DESTATIS, 2021c). In den Jahren 2014 bis 2018 erwirtschaftete das verarbeitende Gewerbe<sup>1</sup> ca. 17 % der jährlichen deutschen Bruttowertschöpfung (Abb. 2.2; DESTATIS, 2021b). Seit dem Ende der weltweiten Finanzkrise 2009 generierte die Industrie<sup>2</sup> zehn Jahre in Folge einen Anteil von über 25 % an der Bruttowertschöpfung, im Jahr 2019 fiel dieser auf 24,3 % (DESTATIS, 2021c). Die nationale Industriestrategie Deutschlands sieht vor, dass bis zum Jahr 2030 die Bruttowertschöpfung wieder zu 25 % aus der Industrie generiert werden soll (Bundesregierung, 2019). Die EU strebt an, 2030 20 % der Bruttowertschöpfung aus der Industrie zu generieren, 2018 lag der Wert für die EU-28 bei 18 % (EU-Kommission, 2020b; Eurostat, 2020).

---

<sup>1</sup> Das „Verarbeitende Gewerbe“ umfasst die Herstellung von Waren sowie die Reparatur und Installation von Maschinen und Ausrüstungen. Dies schließt sowohl die Tätigkeiten von Industrie- als auch von Handwerksbetrieben und -unternehmen ein (DESTATIS, 2008).

<sup>2</sup> Der Begriff „Industrie“ wird in dieser Studie gemäß der Definition von EUROSTAT verwendet. Demnach gehören zur Industrie neben dem „Verarbeitenden Gewerbe“ die Wirtschaftszweige „Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden“, „Energieversorgung“ sowie „Wasserversorgung; Abwasser- und Abfallentsorgung und Beseitigung von Umweltverschmutzungen“ (DESTATIS, 2008; Eurostat, 2016).



**Abbildung 2.2:** Entwicklung der Bruttowertschöpfung (BWS) in Deutschland (nach DESTATIS, 2021c). \*ausgewählte Wirtschaftszweige der Industrie: Papier, Chemie, Kunststoffe, Metallherzeugung und -bearbeitung, Metallherzeugnisse, Elektronik, elektrische Ausrüstungen, Maschinenbau, Kraftwagen und Sonstiger Fahrzeugbau.

Ein kurzer Abriss der derzeitigen heimischen Rohstoffversorgungslage soll aufzeigen, dass Möglichkeiten zur Rohstoffförderung in Deutschland gegeben sind und ihren Beitrag leisten, bis auf die Produktion von Steinen und Erden jedoch nicht zur Deckung des Bedarfs ausreichen.

### Mineralische Rohstoffe

Der Bedarf an Steine und Erden kann überwiegend aus inländischer Produktion gedeckt werden (BGR, 2021). Der Bergbau von heimischem Gips und Anhydrit deckte 2019 mit 4,85 Mio. t/a ca. 49 % des inländischen Bedarfs, durch weitere 6 Mio. t REA-Gips aus der Rauchgasentschwefelung von Braunkohle und Steinkohle konnte der Gipsbedarf zu 100 % gedeckt werden (BGR, 2020). Durch die Reduktion der Kohleverstromung und einen geringeren Energiebedarf sank die REA-Gipsproduktion 2020 auf 3,86 Mio. t (BGR, 2021). Mit dem Wegfall des REA-Gipses durch den Kohleausstieg wird die Bedarfslücke ab 2038 anderweitig bedient werden müssen. Deutschland produziert für die Bauwirtschaft 95 % der benötigten Natursteine, Sand und Kies (BGR, 2021). Der heimische Abbau von Bausand, Baukies und gebrochenem Naturstein erhöhte sich von 2019 auf 2020 von insgesamt 163 Mio. t auf 168 Mio. t (DESTATIS, 2021e). Die inländisch geförderten ca. 9,8 Mio. t Quarzsand werden neben der Produktion von Baustoffen auch in der Wasseraufbereitung oder Glasherstellung verwendet (BGR, 2021, 2016).

## Industrieminerale

Weitere heimische Industrieminerale wie Kaolin, Bentonit oder Fluss- und Schwerspat finden verschiedene Anwendungen im verarbeitenden Gewerbe (BGR, 2017). Deutschland war 2019 mit 7,4 Mio. t der weltweit viertgrößte Produzent für Steinsalz inkl. Siedesalz und Sole (BGR, 2020). Der Abbau von Kali- und Kalisalzprodukten, 6,2 Mio. t im Jahr 2020, trägt jährlich zur Deckung des Bedarfs in der chemischen Industrie, Düngemittelindustrie und anderer Industriesektoren bei (BGR, 2021).

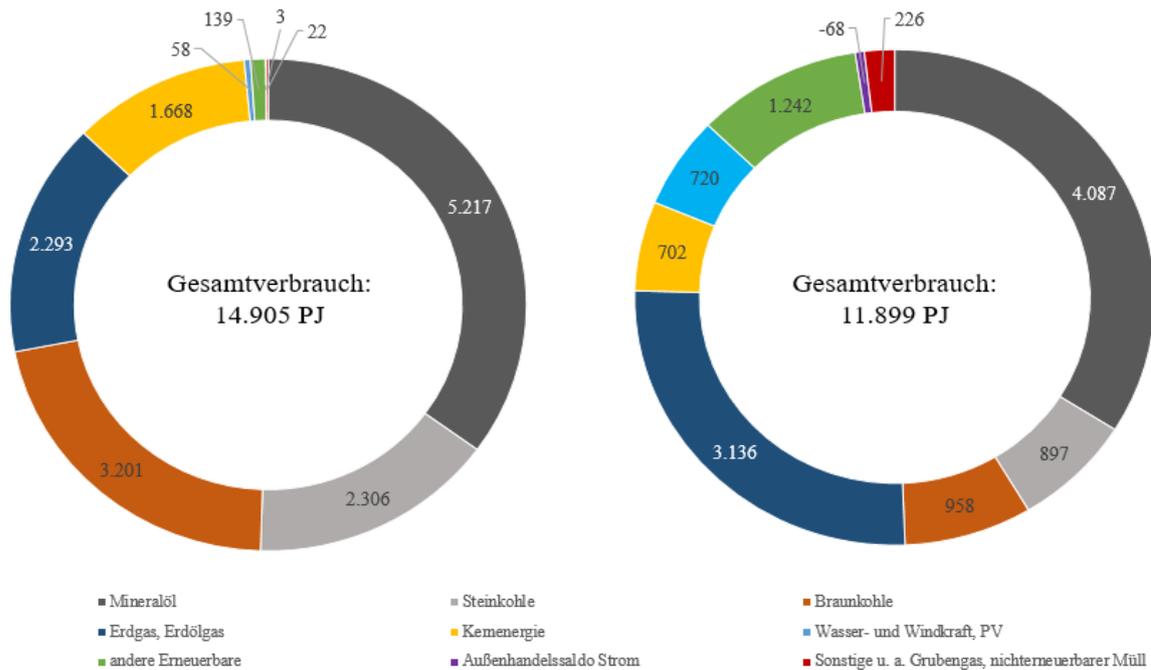
## Kohlenwasserstoffe: Erdöl, Erdgas, Kohle

Die Bedeutung der heimischen Gewinnung von Erdöl, Erdgas und Kohle als Energieträger und für die stoffliche Nutzung in der Industrie nimmt ab und der Bedarf wird hauptsächlich durch den Import gedeckt. Im Jahr 2020 wurden 98,3 % des Mineralöls, 88,7 % der Naturgase<sup>3</sup> und 92,8 % der Kohle zur Primärenergiegewinnung importiert (Nettoimporte<sup>4</sup>) (BMWK, 2022). Etwa 15 % (ca. 15,6 Mio. t) des eingesetzten Erdöls und 5 % (ca. 19,8 Mio. t) der gesamten fossilen Rohstoffe (Erdöl, Erdgas und Kohle) wurden im Jahr 2016 in Deutschland zur stofflichen Nutzung für die chemische Industrie verwendet (Deutscher Bundestag, 2019). Der Anteil der fossilen Energieträger am Primärenergieverbrauch in Deutschland betrug 2020 insgesamt ca. 75 % (ca. 9 EJ<sup>5</sup>), global ca. 83 % (ca. 463 EJ) (BP, 2021). Durch den beschlossenen Ausstieg aus der Braunkohle bis spätestens 2038 werden ca. 8 % (ca. 0,9 EJ, Stand 2020) der Primärenergieerzeugung wegfallen, insgesamt werden durch den Kohleausstieg ca. 16 % (ca. 1,8 EJ, Stand 2020) der fossilen Primärenergieträger und auch die für die Zement- und Betonindustrie wichtige Flugasche substituiert werden müssen (Abb. 2.3, BMWK, 2022). Der Erdgasbedarf in Deutschland wurde 2020 zu 94 % aus dem Ausland gedeckt (AGEB, 2022). Zu über 55 % kam das Erdgas über Pipelines aus Russland (BP, 2021). 2020 stammten quantitativ 30 % der mineralischen Brennstoffe- und Schmiermittelimporte sowie ca. 47 % der Steinkohleimporte nach Deutschland aus der Russischen Föderation (DESTATIS, 2021a, d). In den vergangenen fünf Jahren betrug der Anteil an Koks-kohle, die vornehmlich als Reduktionsmittel bei der Stahlproduktion dient, am gesamten Steinkohleimport jährlich ca. 5 % (DESTATIS, 2021h).

<sup>3</sup> Naturgase: Erdgas, Erdölgas, Grubengas und andere Gase (BMWK, 2022).

<sup>4</sup> Nettoimporte: Anteil der Summe aus Einfuhr minus Ausfuhr minus Bunker am Primärenergieverbrauch (BMWK, 2022).

<sup>5</sup> EJ = Exajoule, 1 EJ = 1000 PJ; PJ = Petajoule, 1 PJ ~ 278 GWh.



**Abbildung 2.3:** Primärenergieverbrauch in Deutschland in PJ für die Jahre links 1990 und rechts 2020. Der Gesamtprimärenergieverbrauch pro Jahr ist von 1990 bis 2020 um ca. 3 EJ gesunken, der Anteil an fossilen Energieträgern ist dabei von 87 % auf 76,3 % gesunken, wobei der Anteil an Erdgas von 15,4 % auf 26,4 % gestiegen ist (nach BMWK, 2022).

## Metallrohstoffe

Metalle werden nach Deutschland importiert, verhüttet und raffiniert, wodurch auch potenziell kritische Rohstoffe, wie beispielsweise Gallium, als Nebenprodukt gewonnen werden (Liedtke und Huy, 2018). Heimische Metalllagerstätten, wie die seit 2011 in Zinnwald-Georgenfeld im Erzgebirge erkundete Lithium-Zinn-Wolfram-Lagerstätte, die erkundete Kupferlagerstätte bei Spremberg in Brandenburg und andere werden derzeit untersucht und könnten in Zukunft zur Rohstoffversorgung beitragen (Deutsche-Lithium, 2021; BGR, 2021). Auch die innovative Lithiumgewinnung stellt eine Perspektive dar, ab 2025 ca. 40 kt LCE (Lithiumkarbonatäquivalent) aus Geothermalwässern im Oberrheingraben zu produzieren (VER, 2022d). Recycling kann die Metallnachfrage zum Teil decken, wenn Hütten und Raffinerien im Land vorhanden sind, die alle notwendigen Trägermetalle verarbeiten könnten (Verhof et al., 2004; Reuter et al., 2019). Zudem können einige Technologiemetalle nur als Nebenprodukt von Verhüttung und Raffination gewonnen werden (Reuter, 2018). Die Recyclingraten sind materialspezifisch, bei Kupfer lag diese 2019 in Deutschland bei 41 %, in der EU 2014 bei 17 % (End-of-Life-Recycling-Eingangsrate, EOR-RIR) (BGR, 2020; Talens Peiro et al., 2018). Das Recycling von Metallen aus komplexen Abfällen wie Elektronikschrott trägt zum Ausbau der Kreislaufwirtschaft in Deutschland bei (Kreibe et al., 2019; Gurita et al., 2018, Flerus und Friedrich, 2020), wenn die dazu notwendige technische Infrastruktur vorhanden und die Gewinnung von Sekundärrohstoffen ökonomisch und ökologisch ist (Schmidt et al., 2020).

Gestiegene Energiepreise führen seit 2021 zu Kürzungen und Stilllegungen in der europäischen Metallproduktion mit einer Kapazitätsreduktion bei Aluminium um 17 % und bei Zink um 24 %, was zu weiteren Engpässen in den Lieferketten führen könnte (DERA, 2022a). Der seit Ende Februar 2022 andauernde Krieg Russlands gegen die Ukraine führt zusätzlich zu Preissteigerungen

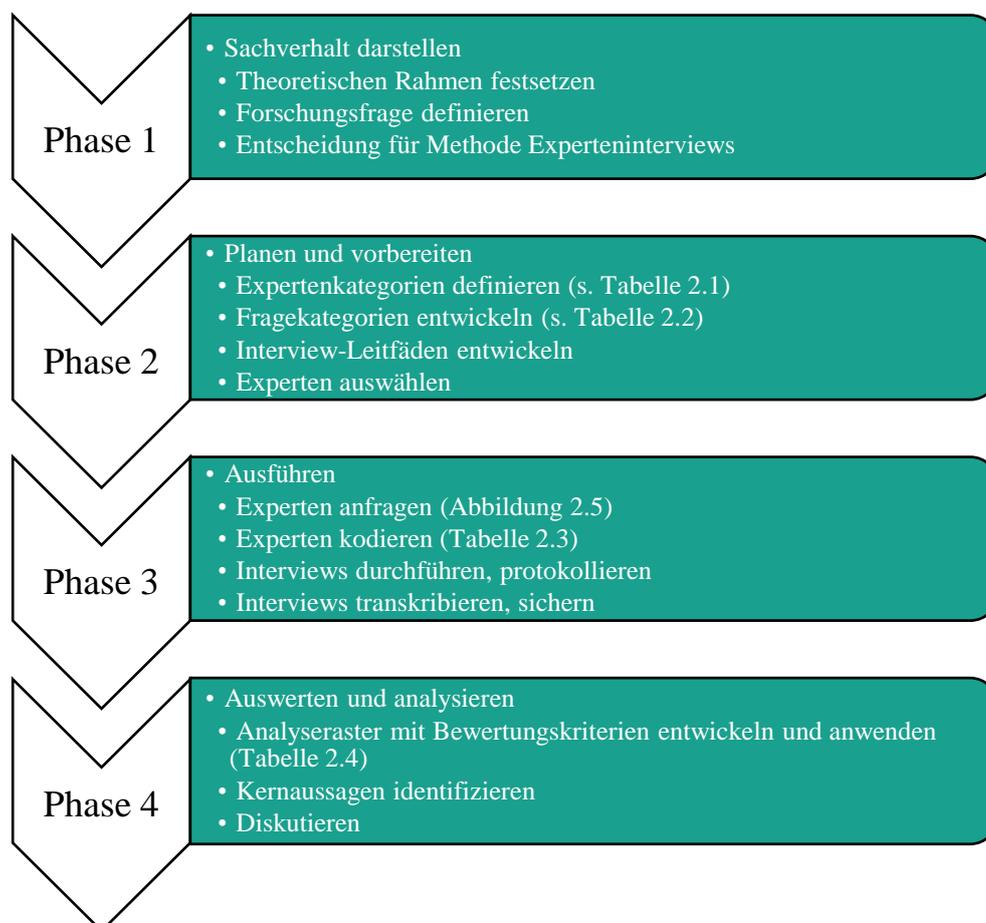
bei Rohstoffen. Vor allem der Nickelpreis entwickelte sich rasant, zeitweise kam es innerhalb weniger Tage zu einer Verdreifachung (VDI, 2022). Deutschland hat 2020 quantitativ 27 % der Nickel- und Nickelwaren aus der Russischen Föderation importiert (DESTATIS, 2021a, 2021h). Die größten Bergwerksförderer von Nickel sind Indonesien mit ca. 720 kt (30,4 %), Philippinen mit ca. 320 kt (12,8 %) und Russland mit 280 kt (11,2 %) (Stand 2020; USGS, 2021). Nickel ist ein wichtiges Legierungsmetall (Szurlies, 2021). Auch bei potenziell kritischen Rohstoffen für Zukunftstechnologien spielt Russland bei der Bergwerksförderung eine wichtige Rolle. Für das Platingruppenmetall Palladium war Russland mit 91 t (43,3 %) Förderung im Jahr 2020 weltweit der Hauptproduzent, gefolgt von Südafrika mit 70 t (33,3 %) (USGS, 2021). Platin wurde im gleichen Jahr zu 12,4 % (21 t) in Russland und zu 70,5 % (120 t) in Südafrika gewonnen (USGS, 2021). Beide Metalle, Platin wie auch Palladium, sind von der EU als kritische Rohstoffe gelistet (EU-Kommission, 2020a). Sie werden in Katalysatoren verwendet und sind essenziell für Wasserstofftechnologien, wie den Bau von Elektrolyseuren (BGR, 2016; Marscheider-Weidemann, 2021).

### **Maßnahmen des Bundes, der Länder und der EU**

Um die Versorgung mit Rohstoffen zu sichern, wurden verschiedene Institutionen gegründet. Dazu zählt die 2010 gegründete staatliche Deutsche Rohstoffagentur (DERA), die die Rohstoffverfügbarkeit analysiert und bewertet. Zudem wurden Rohstoffpartnerschaften mit der Mongolei (2011), Kasachstan (2012) und Peru (2015) sowie Rohstoffkooperationen mit Chile, Australien und Kanada geschlossen (Bundesregierung, 2011, 2012, 2015). In der Neuauflage ihrer Rohstoffstrategie 2019 hat die Bundesregierung 17 Maßnahmen zur Sicherstellung der Verfügbarkeit von nichtenergetischen, mineralischen Rohstoffen in Deutschland, zur Steigerung der Ressourceneffizienz und zur Einhaltung einer nationalen wie internationalen Rohstoffpolitik benannt (BMW, 2019). Neben der nationalen Rohstoffstrategie haben einige Bundesländer, wie beispielsweise die Freistaaten Sachsen und Bayern, jeweils ihre eigenen Rohstoffstrategien, Baden-Württemberg publizierte 2016 eine Ressourceneffizienzstrategie (SMWA, 2017; StMWi, 2021; UM BaWü, 2016). Auch auf europäischer Ebene wird die Rohstoffverfügbarkeit bewertet. So hat die EU-Kommission im September 2020 einen Aktionsplan für kritische mineralische Rohstoffe, eine aktualisierte Liste kritischer Rohstoffe sowie eine Zukunftsstudie über kritische Rohstoffe publiziert (EU-Kommission, 2020a; Bobba et al., 2020). Die Ziele sind u. a. die Diversifikation von Versorgungsquellen, der Ausbau der Kreislaufwirtschaft, die Steigerung der Ressourceneffizienz sowie bestehendes Potenzial, wie ansässiges Wissen, intensiver zu nutzen und geschäftliche Verbindungen innerhalb und außerhalb der EU aufzubauen (EU-Kommission, 2020a). Mit der Gründung der European Raw Materials Alliance (ERMA; Bestandteil des Aktionsplans) soll die Etablierung einer resilienten Rohstoffversorgung für Europa unterstützt werden (EU-Kommission, 2020a).

## 2.4 Methodik

Als methodische Grundlage wurden Experteninterviews durchgeführt (vgl. Mayring, 2019). Experten dienen als Quelle für Fakten, spezifisches Wissen und Erfahrungswerte, sie sind Verantwortliche für die thematisierte Sachlage und besitzen Prozesswissen (Helferich, 2019; Kaiser, 2014), sodass eine effiziente Erhebung von empirischen Daten, besonders von episodischen Sachverhalten, möglich ist (Eisenhardt und Graebner, 2007). Das Expertenwissen ist bedeutsam, da es direkt aus der Praxis erhoben wird und damit auch als Orientierung für andere Akteure dienen kann (Bogner et al., 2014). So wurde ein Stimmungsbild (Stand 2021) durch das Interviewen von 34 unterschiedlichsten Experten erstellt. Die Feststellung des Sachverhalts (Phase 1) wurde von Oktober bis November 2020 ausgeführt. Die Planung und Vorbereitung (Phase 2) der Experteninterviews fand im November und Dezember 2020 statt. Angefragt, durchgeführt und gesichert (Phase 3) wurden die Experteninterviews im Zeitraum von Januar 2021 bis Oktober 2021. Die Auswertung und Analyse (Phase 4) erfolgten im Oktober und November 2021 (Abb. 2.4).



**Abbildung 2.4:** Prozess Experteninterviews, Darstellung des Ablaufs (nach Kaiser, 2014; Mayring und Frenzel, 2019).

### 2.4.1 Phase 1: Sachverhalt darstellen

Als Methode wurde die Durchführung von Experteninterviews gewählt. Unterschiedliche Interessensvertreter aus Unternehmen der Exploration und Produktion sowie der Rohstoffverarbeitung, aus Industrie- und Naturschutzverbänden, Wissenschaft, Landesbergbehörden und Ministerien wurden zum Thema „Gibt es in Deutschland Herausforderungen bei der Rohstoffbeschaffung und -sicherung und wenn ja, welche?“ befragt.

### 2.4.2 Phase 2: Planung und Vorbereitung der Experteninterviews

In dieser Studie wurden die Stichprobengruppen zunächst als zwölf Expertenkategorien definiert, in der die Experten, die für die Beantwortung der Forschungsfrage einen Kreis diverser sachkundiger Informanten darstellen, einzuordnen waren. Tabelle 2.1 listet die Expertenkategorien auf. Die Expertenkategorien wurden durch die Betrachtung der Rohstoffwertschöpfungskette definiert.

**Tabelle 2.1:** Interviewkategorien (<sup>1</sup>Einteilung der Unternehmensgröße nach EU-Kommission, 2003).

Kategorienkürzel	Expertenkategorie, ausführlich
A1	Rohstoffexploration und -produktion von mineralischen Rohstoffen und Energierohstoffen (Start-up) <sup>1</sup>
A2	Rohstoffexploration und -produktion von mineralischen Rohstoffen und Energierohstoffen (Großunternehmen) <sup>1</sup>
A3	Erste Verarbeitung von mineralischen Rohstoffen und Energierohstoffen zur Energiegewinnung und Güterproduktion
A4	Verarbeitung von Halberzeugnissen aus mineralischen Rohstoffen
B	Industrieverband/-verein
C	Naturschutzverband
D	Beratung (Exploration von mineralischen Rohstoffen und Energierohstoffen)
E	Forschungseinrichtung (mineralische Rohstoffe)
F	Landesbergbehörde
G	Ministerium
H	Finanzen
I	Infrastruktur

Mit Leitfadeninterviews, die neben dem vereinbarten systematischen Ablauf, dem Leitfaden, eine Struktur mit Sachfragen aufweisen, konnte das Interview so strukturiert wie nötig und gleichzeitig so offen wie möglich gehalten werden (z. B. Helferich, 2019). Es wurden entsprechend der Expertenkategorien Leitfäden mit individuellen, aber für die Vergleichbarkeit auch sich überschneidenden Fragen aus sechs Themengebieten erarbeitet (Tab. 2.2; Anhang 7.1). Die Leitfragebögen wurden bei Zusage zum Interview allen Gesprächspartnern vor der Befragung zugeschickt. Fragen aus den Themenfeldern (1), (2) und (5) wurden allen Experten gestellt, sodass die Vergleichbarkeit gewährleistet wurde (Tab. 2.2). Fragen zur Zusammenarbeit von Unternehmen oder Verbänden und Landesbergbehörden (3) sowie zur unternehmerischen Rohstoffsicherung (4) wurden nur in den Expertenkategorien gestellt, in denen die entsprechenden Themen Gegenstand des Tagesgeschäfts sind. Fragen zum Geschäftsfeld wurden auch allen Experten gestellt. Den

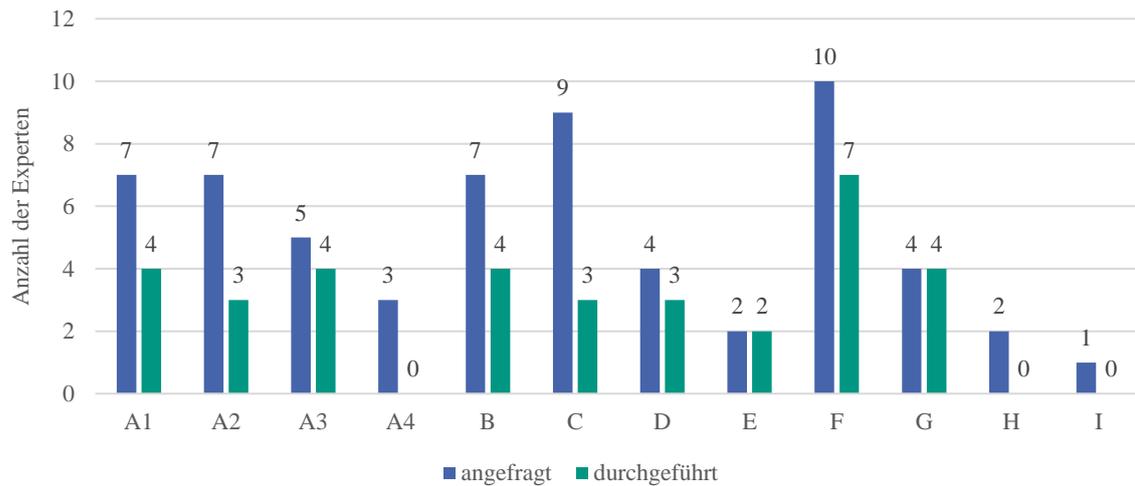
Experten wurden aus den Themenfeldern (1), (2) und (5) durchschnittlich acht Fragen und aus allen Themenfeldern durchschnittlich 13 Fragen gestellt (Tab. 2.2; Anhang 7.2, Tab. 7.1).

**Tabelle 2.2:** Themenfelder und Anzahl der Fragen an die Experten in den jeweiligen Expertenkategorien.

Kürzel	1	2	3	4	5	6	Gesamt
	Wirtschaftsstandort Deutschland	Staat/Regularien	Zusammenarbeit	Unternehmerische Rohstoff-sicherung	Herausforderungen	Geschäftsfeldspezifisch/Arbeitsumfeld	
A1	3	4	1	0	1	9	18
A2	3	4	1	0	3	1	12
A3	3	4	0	2	1	3	13
B	3	4	1	4	3	1	16
C	2	4	1	2	2	1	12
D	3	4	0	0	2	3	12
E	2	4	0	3	2	2	13
F	1	3	1	0	2	5	12
G	2	3	1	0	2	3	11

### 2.4.3 Phase 3: Ausführung

Vor Beginn der Interviews wurde als Sättigungsgrenze für die Anzahl an Interviews keine bestimmte Anzahl, jedoch der Anspruch an Diversität, Informationsgehalt und Aussagekraft festgelegt. Die Literatur gibt als Ansatz zur Bestimmung der Interviewanzahl u. a. auch die eigene Einschätzung der Sättigung des Informationsgrades der durchgeführten Interviews vor (Sandelowski, 1995; Malterud et al., 2016). Als durchschnittliche Stichprobengröße bei qualitativen Interviews wurden von Mason (2010) 31 Experten angegeben. Für diese Studie wurden über eigene Kontakte 53 Experten kontaktiert, sieben weitere kamen auf Empfehlung von Experten, mit denen bereits Interviews durchgeführt wurden, hinzu. Insgesamt haben sich 34 von 60 Experten zu einem Interview bereit erklärt. In Abbildung 2.5 werden die angefragten und durchgeführten Experteninterviews in den einzelnen Kategorien aufgezeigt. Tabelle 2.3 listet die Experten mittels eines Codes auf, der sich entsprechend der Interviewnummer, der Hierarchiestufe (unteres Management = UM; mittleres Management = MM, Geschäftsführung und Leitung = GF) und der zugehörigen Kategorie zusammensetzt: „Experte#InterviewnummerHierarchiestufe/Kategorie“.



**Abbildung 2.5:** Angefragte und durchgeführte Experteninterviews.

**Tabelle 2.3:** Zuordnung der Experten zu den Expertenkategorien mittels Codierung

Kategorie	Expertencodierung						
A1	E#2GF/A1	E#3GF/A1	E#4GF/A1	E#34GF/A1			
A2	E#6MM/A2	E#22MM/A2	E#35MM/A2				
A3	E#9UM/A3	E#18MM/A3	E#21UM/A3	E#5UM/A3			
B	E#11GF/B	E#23MM/B	E#31UM/B	E#32UM/B			
C	E#26MM/C	E#28UM/C	E#29MM/C				
D	E#8GF/D	E#10GF/D	E#30GF/D				
E	E#7MM/E	E#14MM/E					
F	E#12MM/F	E#13GF/F	E#15GF/F	E#16GF/F	E#17UM/F	E#19GF/F	E#20GF/F
G	E#24MM/G	E#25GF/G	E#27GF/G	E#33GF/G			

Die Interviews verliefen stets nach dem gleichen Prinzip: Vorstellung der Teilnehmenden, Aufforderung des Experten zur freien Erzählung und Abhandlung der Fragen. Die eigentliche Interviewdauer belief sich auf eine bis anderthalb Stunden. Die Interviews wurden ausschließlich virtuell durchgeführt und nicht aufgezeichnet. Die Beantwortung der Fragen sowie das Festhalten aller weiteren Informationen erfolgte schriftlich durch die Interviewerin.

#### 2.4.4 Phase 4: Auswertung und Analyse der Experteninterviews

Gläser und Laudel (2010) empfehlen für die Auswertung von Experteninterviews eine qualitative Inhaltsanalyse. Dabei werden der entstandenen Informationssammlung in einem systematischen Verfahren die relevanten Informationen entnommen und separat vom Text weiter ausgewertet. So wird die Datenmenge auf das Wesentliche reduziert. Für die vorliegende Studie wurde ein Analyseraster entwickelt, das spezifisch zu jeder Frage verschiedene Stufen zur Bewertung aufweist (Tab. 2.4). Eine weitere statistische Auswertung der Expertenantworten erfolgte nicht, da quantitative Merkmale, wie beispielsweise eine Gewichtung der Antworten, nicht Bestandteil der Interviews waren. Die Interviewantworten zum Themenfeld Geschäftsspezifisch/Arbeitsumfeld (6) wurden nicht bewertet, sondern als Informationen zur jeweiligen Expertenkategorie aufgenommen.

**Tabelle 2.4:** Bewertungsmöglichkeiten der Interviewantworten.

Frage	Bewertungsmöglichkeiten der Interviewantworten				
1.1	Optimistisch	Eher optimistisch	Neutral	Eher pessimistisch	Pessimistisch
1.2	Positiv	Eher positiv	Neutral	Eher negativ	Negativ
1.3	Ja		Neutral		Nein
2.1.1	Ja		Neutral		Nein
2.1.2	Beschreibung der Rolle				
2.2	Ja	Ja, aber Anpassungen wären wünschenswert.		Nein	
2.3	Zufrieden	Eher zufrieden	Neutral	Eher unzufrieden	Unzufrieden
2.4	Ja		Vielleicht		Nein
3	Positiv	Eher positiv	Neutral	Eher neutral	Negativ
4.1	Ja				Nein
4.2	Ja				Nein
4.3	Ja		Vielleicht		Nein
5	Benennung der Herausforderungen				

Grundsätzlich erlaubt die qualitative Inhaltsanalyse es auch, die Themenfelder oder Expertenkat­egorien während der Auswertung zu erweitern, da neue, vorher nicht abzusehende Erkenntnisse auftauchen, die verarbeitet werden sollten (Gläser und Laudel, 2010; Mayring, 2019). Daher wurden nach der Auswertung der Antworten zu Frage 5 die von den Experten benannten Herausforderungen in vier Bereiche eingeteilt (Abb. 2.6).

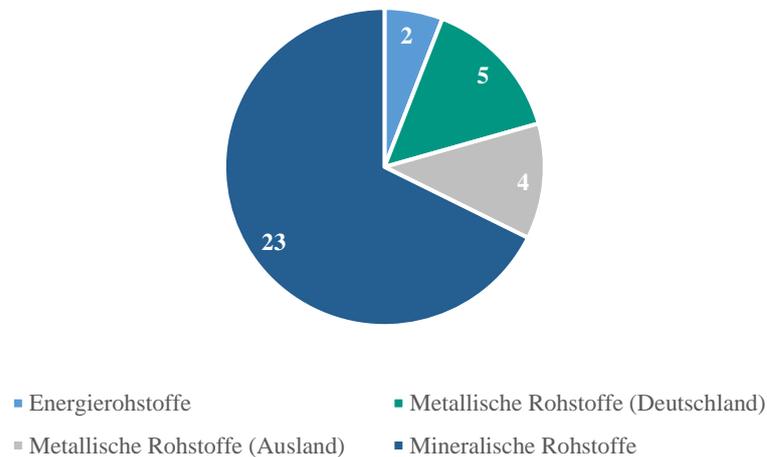
**Abbildung 2.6:** Nach der Auswertung der Herausforderungen definierte Bereiche.



Die folgende Auswertung legt den Fokus auf 30 Interviews, die sich ausschließlich auf Deutschland beziehen. Die vier weiteren Interviews mit internationalen Experten, die den Kategorien Exploration und Produktion (A1) sowie Verarbeitung von Primärrohstoffen (A3) zuzuordnen sind, dienen in den Themenfeldern Rohstoffsicherung (4) und Herausforderungen (5) zum Vergleich.

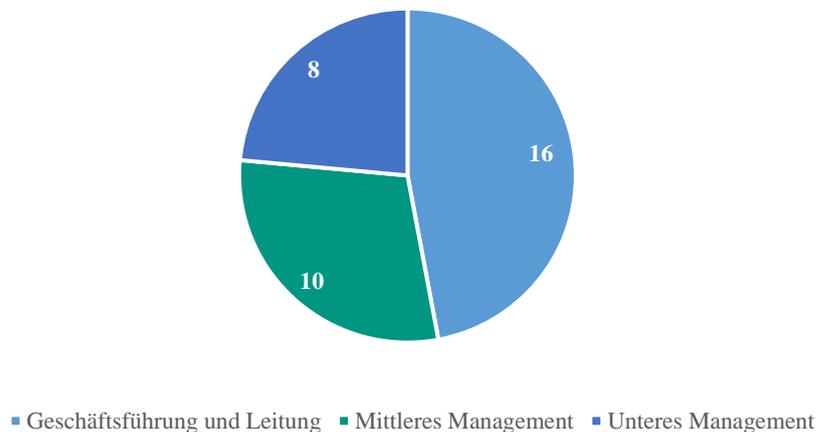
## 2.5 Ergebnisse

Der Großteil der interviewten Experten (32) ist dem Bereich mineralische Rohstoffe zuzuordnen, neun davon können spezifisch den metallischen Rohstoffen zugewiesen werden. Zwei Personen sind Experten für Energierohstoffe (Abb. 2.7).



**Abbildung 2.7:** Einteilung der Experten auf Rohstoffarten.

Die Experten repräsentieren verschiedenen Hierarchiestufen. Acht Experten sind dem unteren Management und zehn dem mittleren Management zuzuordnen. 16 Experten sind aus der Geschäftsführung und Leitungsebene (Abb. 2.8).



**Abbildung 2.8:** Einteilung der Experten auf Hierarchieebenen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Befragung zu den Themenfeldern (1) bis (5) dargestellt. Die aufgeführten Fragen sind sinngemäß wiedergegeben, die Übersicht ist in Tabelle 2.6 zu finden.

## 2.5.1 Wirtschaftsstandort Deutschland

### Frage 1.1: Sehen Sie für Ihr Geschäftsmodell eine Zukunft in Deutschland? / Welche Zukunftsrolle würden Sie dem Bergbau in Deutschland geben?

Sieben von 13 Experten aus Industrie und Ministerien stehen den Möglichkeiten von Exploration und Produktion von Rohstoffen in Deutschland *eher pessimistisch* bis *pessimistisch* gegenüber. Begründet werden diese Antworten mit Eindrücken, dass die Mehrheit des Bergbaus in Deutschland ein Lobbyproblem habe (E#22MM/A2), oder dass Bergbau nur noch in Ost- oder Nordeuropa oder Frankreich möglich sei (E#35MM/A2, E#30GF/D). Die Branche der fossilen Energierohstoffe wird als ein „Auslaufmodell“ in Deutschland betitelt (E#6MM/A2) und es wird vermutet, dass „die Bergbaubranche (...) am Ende des Jahrzehnts in Deutschland evtl. tot“ sei (E#11GF/B). Fünf von 13 Experten aus der rohstoffverarbeitenden Industrie und den Ministerien stehen *neutral* zu Frage 1.1, da diese nicht pauschal für alle heimischen Rohstoffarten beantwortet werden könne (E#27GF/G). Wenn die wirtschaftliche Situation gut bliebe, Lieferketten stabil gehalten werden könnten und das Potenzial des Spezialwissens der ansässigen Unternehmen genutzt würde, könnte für das rohstoffverarbeitende Gewerbe eine Zukunft in Deutschland gesehen werden (E#21UM/A3). Mit technologischen Innovationen könnte das rohstoffverarbeitende Gewerbe sich den Anforderungen der CO<sub>2</sub>-Reduktionsmaßnahmen stellen (E#9UM/A3). Die Erfüllung von hohen Standards wird als positiver Grund für eine heimische Rohstoffförderung genannt (E#25GF/G). E#2GF/A1 blickt für seine Branche, Exploration und Produktion von Rohstoffen, *optimistisch* in die Zukunft (Abb. 2.9).

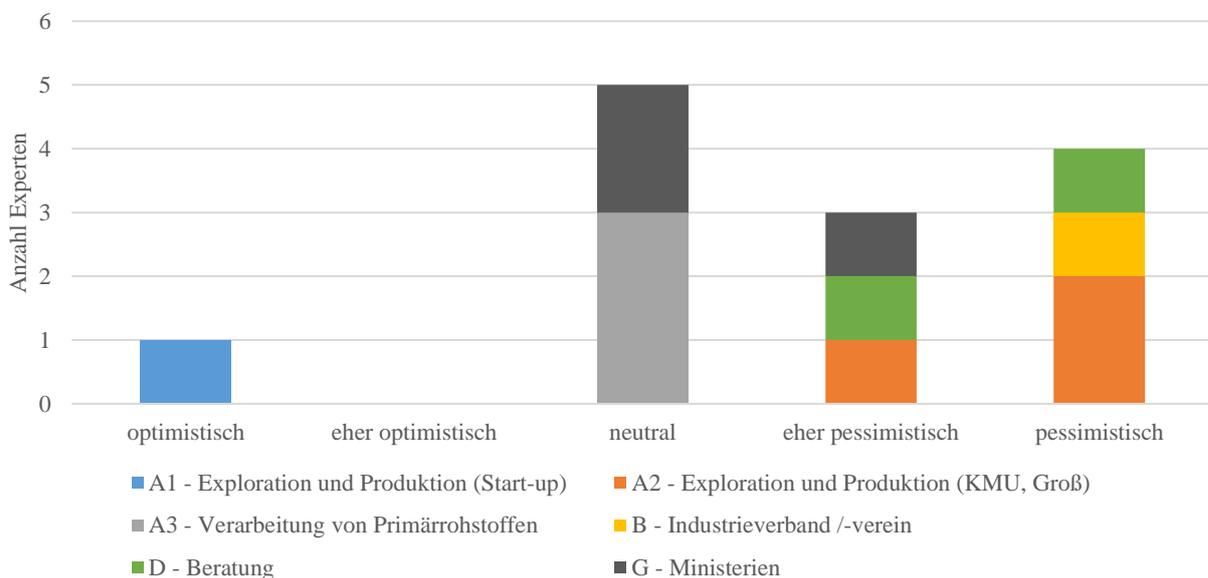


Abbildung 2.9: Interviewergebnisse Frage 1.1, Themenfeld Wirtschaftsstandort Deutschland.

**Frage 1.2: Wie sehen Sie die Rolle Deutschlands bei der Rohstoffversorgung im internationalen Vergleich?**

Die Hälfte aller Experten (15 von 30), aus allen Expertenkategorien bis auf den Ministerien, sieht die Rolle Deutschlands bei der Rohstoffversorgung im internationalen Vergleich *eher negativ* bis *negativ*. Begründet wird dies u. a. damit, dass „dem Faktor Rohstoffbeschaffung teilweise zu wenig Achtung geschenkt wird“ (E#21UM/A3; E#15GF/F), „andere führende Wirtschaften wie China oder die USA (...) viel stärker aufgestellt sind“ (E#11GF/B) und grundsätzlich keine Übergangszeit zwischen dem fossilen und klimaneutralen Zeitalter mehr bliebe, da nicht zukunftsorientiert gehandelt wurde und werde (E#18MM/A3, E#8GF/D, E#10GF/D). Auch wird als kritisch betrachtet, dass „Kompetenzen ins Ausland verlagert werden“ (E#14MM/E, E#20GF/F) und das heimische Potenzial nicht ausgenutzt werde (E#19GF/F). Industrie und Landesbergbehörden sind sich darüber einig, dass es für Exploration und Produktion, gerade für Erdöl und Erdgas, unwirtschaftlich sei, in Deutschland tätig zu sein (E#2GF/A1, E#17UM/F). Für E#11GF/B sind die Rolle und Beziehung zu China und Russland bei der Sicherstellung der Verfügbarkeit der Rohstoffe für Deutschland entscheidend und gerade die „Verbindung zu Russland sollte nicht negativ gesehen werden“. Bestätigend ist hier der Hinweis eines internationalen Experten, E#3GF/A1, der darauf hinweist, dass mehr als 80 % des globalen Rohstoffmarktes für Batterien von China kontrolliert werden. E#8GF/D erläutert, dass es schwer sei, im globalen Rohstoffmarkt mitzureden, wenn kein nennenswertes deutsches Unternehmen im Rohstoffabbau mehr tätig sei. Elf von 30 Experten, aus Industrie, Verbänden, Landesbergbehörden und Ministerien, blicken *neutral* auf die Situation der Rohstoffbeschaffung für Deutschland und gehen teilweise davon aus, dass durch die noch nicht vollständig ausgeschöpften Möglichkeiten des heimischen Abbaus (E#19GF/F) und die Fortführung dessen (E#24MM/G) die Situation nicht negativ zu betrachten sei. Steigende Recyclingquoten und eine entsprechend wachsende Entwicklung von Wertstoffen trage in Deutschland zur Rohstoffsicherung ebenfalls bei (E#33GF/G). Es wird auch angemerkt, dass es die Pflicht der rohstoffverarbeitenden Industrie sei, sich um die Sicherung der benötigten Rohstoffe zu kümmern (E#22MM/A2). Wenn die Rohstoffbedarfe realistisch berechnet werden würden, könnten Verfügbarkeit und Bedarf zusammengeführt werden (E#28UM/C). Wenn Unternehmen sich mehr Kenntnisse im Bereich der Finanzierung aneignen würden, dann könnten die Mittel, die der Bund zur Verfügung stellt, auch ausgenutzt werden (E#30GF/D). Vier von 30 Experten aus der Industrie und den Landesbergbehörden nehmen die Situation der Rohstoffbeschaffung *eher positiv* wahr, da sie u. a. den Fokus auf die Einsparung von Emissionen und Kosten durch Transport legen würde (E#12MM/F, E#13GF/F) (Abb. 2.10).

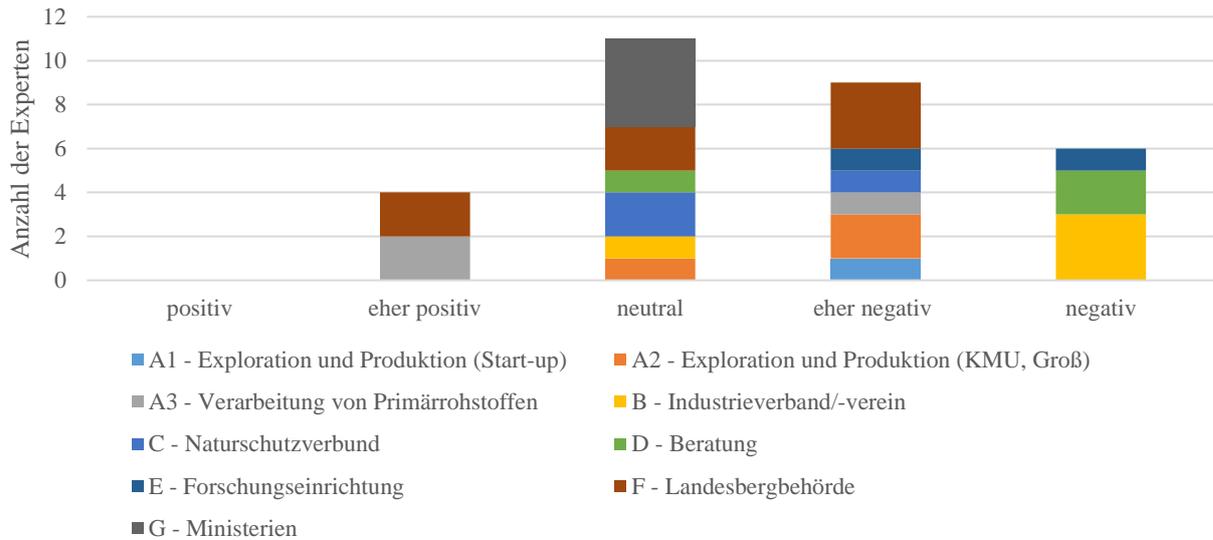


Abbildung 2.10: Interviewergebnisse Frage 1.2, Themenfeld Wirtschaftsstandort Deutschland.

**Frage 1.3: Hat die Ausrichtung der Rohstoffversorgung einen Einfluss auf die Konkurrenzfähigkeit von Deutschland?**

Alle 18 befragten Experten sind sich darüber einig, dass die Ausrichtung der Rohstoffversorgung einen Einfluss auf die internationale Konkurrenzfähigkeit Deutschlands habe (Abb. 2.11). E#32UM/B merkt an, dass „ohne importierte Rohstoffe (...) die Produktion in Deutschland nicht möglich“ sei. Zwei Experten aus der Kategorie Beratung befürchten, dass der Einfluss von Regierungen auf die Rohstoffmärkte immer größer werden wird und irgendwann „nicht mehr ein freier Markt die Verfügbarkeit von Rohstoffen regeln“ (E#10GF/D) werde.

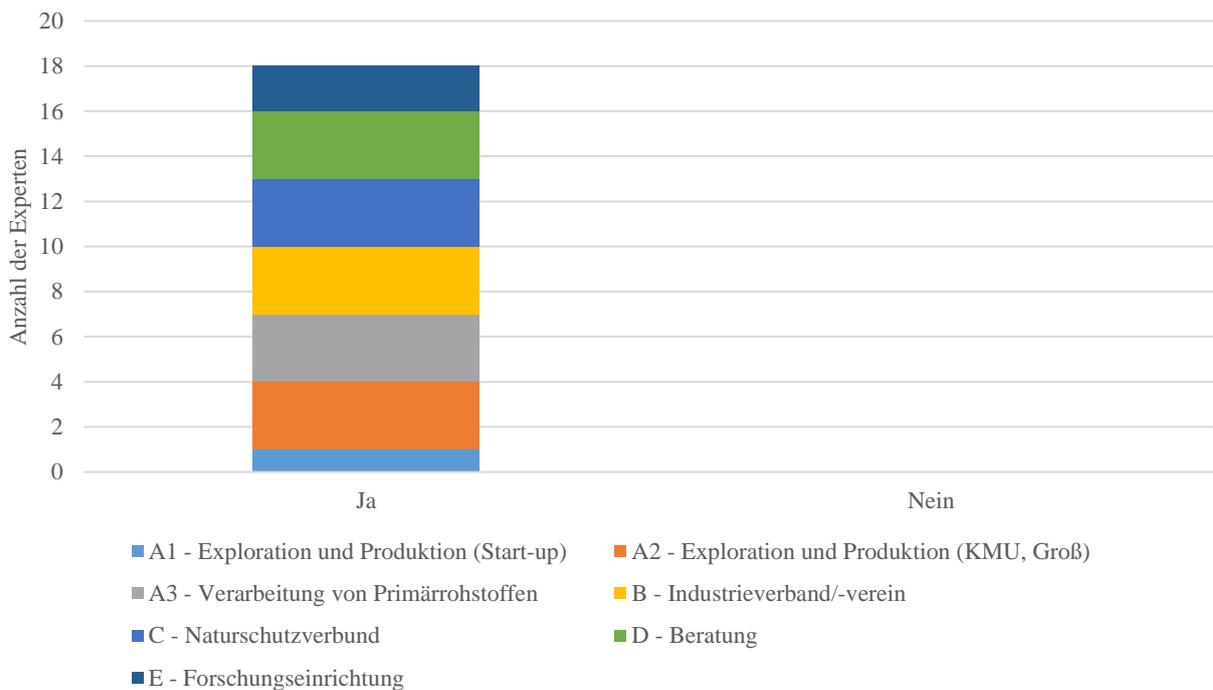


Abbildung 2.11: Ergebnisse Frage 1.3, Themenfeld Wirtschaftsstandort Deutschland.

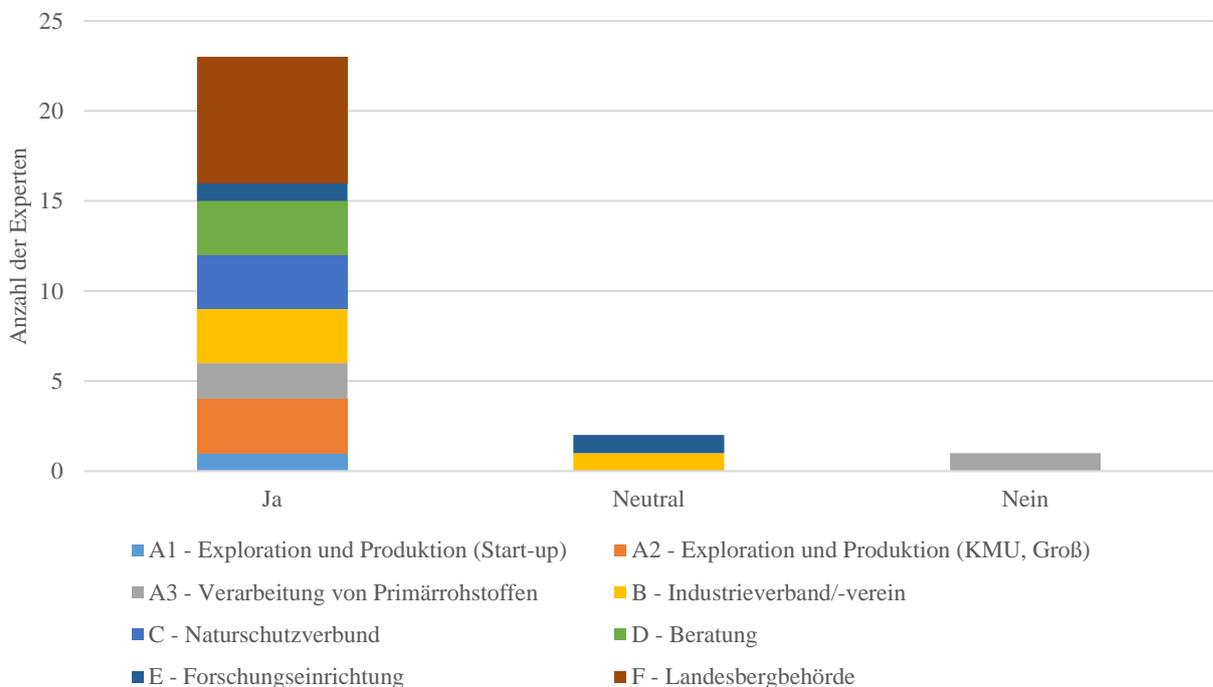
Aus dem Themenfeld „Wirtschaftsstandort Deutschland“ lassen sich zusammenfassend die Herausforderungen „öffentliche Akzeptanz“ für die Rohstoff explorierende und produzierende Industrie in Deutschland sowie „internationale Konkurrenzfähigkeit“ der deutschen Wirtschaft filtern.

## 2.5.2 Staat/Regularien

**Frage 2.1.1: Sollte der Staat bei der Frage nach der Rohstoffversorgung eine Rolle haben?**

**Frage 2.1.2: Wenn ja, welche Rolle sollte der Staat übernehmen?**

Für 23 von 26 Experten sollte der Staat eine Rolle bei der Frage nach der Rohstoffversorgung einnehmen. E#23MM/B und E#7MM/E stehen der Rollenverteilung *neutral* gegenüber und E#18MM/A3 findet, dass der Staat keine Rolle einnehmen sollte (Abb. 2.12).



**Abbildung 2.12:** Interviewergebnisse Frage 2.1.1, Themenfeld Staat/Regularien.

22 (davon bei 2.1.1 21x Ja und 1x Neutral) von 26 Experten haben die Rolle, die der Staat einnehmen soll, spezifiziert (Abb. 2.13). Acht von 22 Experten erwähnen, der Staat sollte eine unterstützende Rolle einnehmen und weitere acht von 22 Experten denken, der Staat sollte Rahmenbedingungen festlegen. Durch die richtigen Rahmenbedingungen könnten die Regeln der internationalen Handelsorganisation (WTO) angewendet werden und die Interessen der deutschen Wirtschaft bei der WTO vertreten werden (E#31UM/B, E#32UM/B). E#16GF/F und E#17UM/F sind der Ansicht, dass die Rolle, die der Staat bereits habe, ausreicht, um die bereits zur Verfügung stehenden Instrumente anwenden zu können. E#35MM/A2 regt an, dass Prozesse in Genehmigungsverfahren, aber auch Bedarfe klar definiert werden sollten und bezieht sich hierbei auf die heimische Rohstoffförderung. Der Staat sollte als Kontrollorgan beim nachhaltigen Umgang mit Ressourcen agieren, findet E#28UM/C, und E#18MM/A3 verdeutlicht seine Haltung, dass der Staat keine Rolle

innehaben sollte und empfiehlt, dass der Staat sich aus der Rohstoffbeschaffung raushalten sollte, da der Markt diese reguliere.

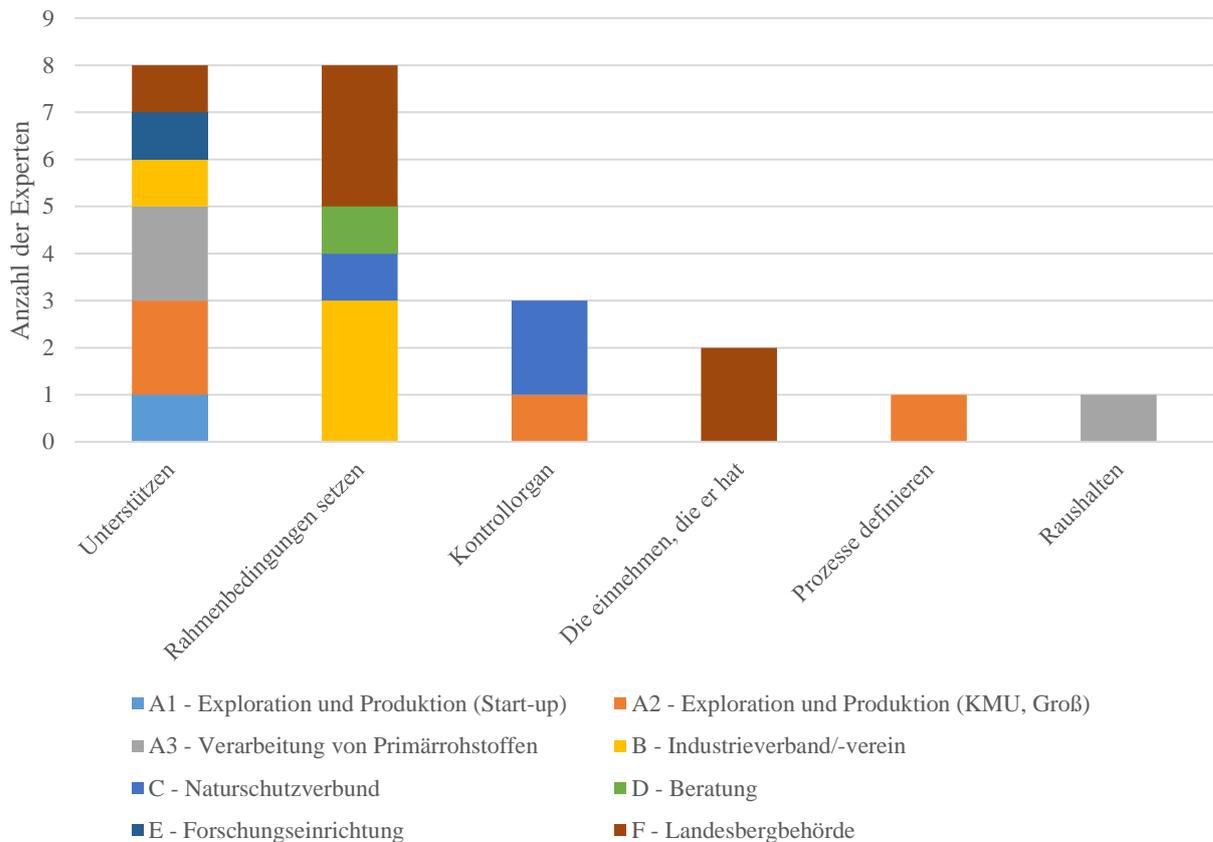


Abbildung 2.13: Interviewergebnisse Frage 2.1.2, Themenfeld Staat/Regularien.

Außerdem haben 13 von 22 Experten Themen benannt, um die der Staat sich verstärkt kümmern sollte (Abb. 2.14). Hier kommen Mehrfachnennungen vor. Acht von 13 fordern eine größere Unterstützung der heimischen Rohstoffförderung. Vier von acht erachten eine stärkere Positionierung des Themas Rohstoffe in der Außenpolitik für wichtig. E#21UM/A3 und E#12MM/F sind der Ansicht, dass es stärkere Anreize für deutsche Unternehmen geben müsse, im Rohstoffsektor im Ausland tätig zu werden, beispielsweise durch die Wiedereinführung eines Explorationsförderprogramms. In diesem Zuge wäre auch die praktische Ausbildung deutscher Ingenieure im Bergbausektor weiter möglich. E#12MM/F und E#19GF/F weisen auf die Verbesserung des Datenmanagements beispielsweise durch den Ausbau der geologischen Datenlage in Deutschland hin. Aus den Reihen der Ministerien selbst schlug E#33GF/G vor, für die Sicherung der Sekundärrohstoffe mehr verantwortlich zu werden. Gelöst werden könnte dies durch Vorgaben zur getrennten Erfassung, Quoten und Qualitätsvorgaben. Außerdem denkt E#27GF/G, dass der Staat gemeinsam mit der Wirtschaft die Option der Lagerhaltung diskutieren sollte.

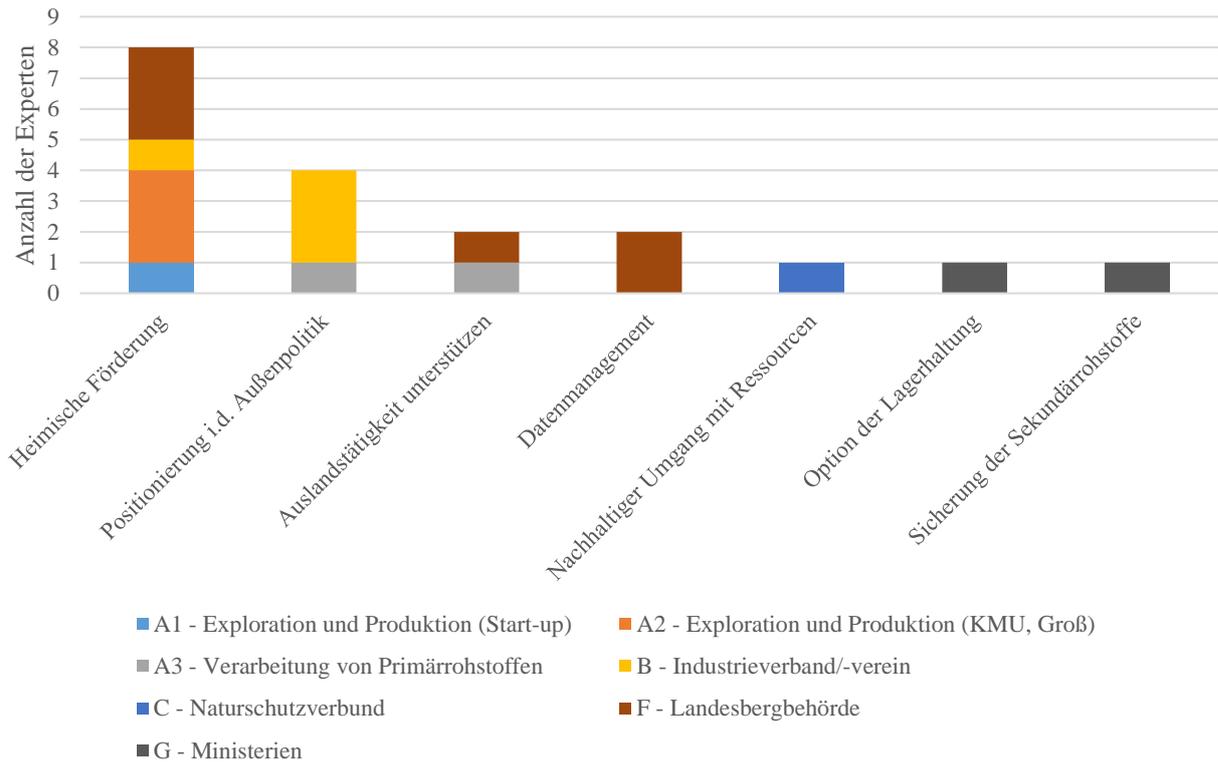


Abbildung 2.14: Ergänzungen zu den Interviewergebnissen von Fragen 2.1.1 und 2.1.2. Themen, um die der Staat sich verstärkt kümmern sollte, Themenfeld Staat/Regularien.

**Frage 2.2: Gibt es ausreichende staatliche Regularien im Bereich der Rohstoffversorgung?**

Zwölf von 27 Experten erachten die bestehenden Regularien im Bereich der Rohstoffversorgung in Deutschland für ausreichend. Vier von 27 Experten erachten sie als nicht ausreichend und elf von 27 empfinden sie grundsätzlich als ausreichend, allerdings sollten Anpassungen vorgenommen werden (Abb. 2.15).

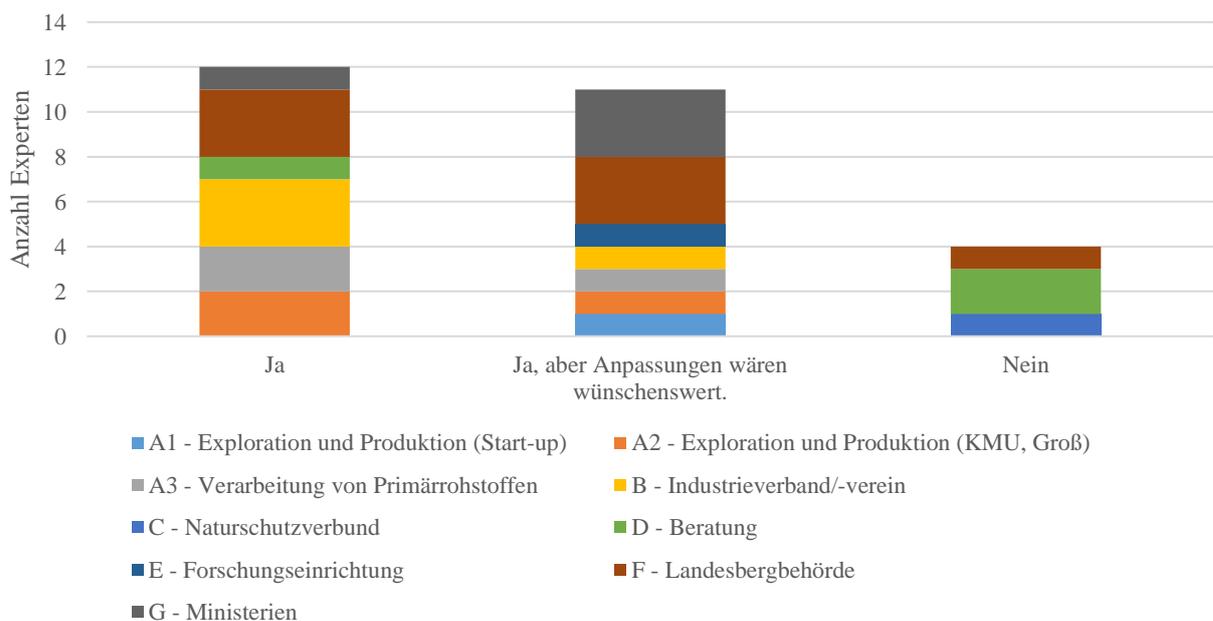


Abbildung 2.15: Interviewergebnisse Frage 2.2, Themenfeld (2) Staat/Regularien.

Sieben von elf Experten aus Industrie, Naturschutzverbänden, Behörden und Ministerien erachten eine grundlegende Überarbeitung des Bundesberggesetzes (BBergG) für notwendig (Abb. 2.16, Stand vor der Novellierung vom 14.06.2021). Das BBergG könnte effizienter (E#2GF/A1) und weniger kompliziert gestaltet (E#13GF/F) werden und „die Verwaltungsverfahren zeitlich an die aktuellen und zukünftigen Gegebenheiten angepasst werden“ (E#20GF/F). Außerdem wird angeregt, dass „eine ehrliche Abwägung in Bezug auf die Beanspruchung der Natur“ (E#28UM/C) geschehen solle und das Bergbauprivileg (Befreiung Wasserentnahmeentgelt) gänzlich in allen Bundesländern abgeschafft werden solle (E#17UM/F). Geäußert wird auch, dass eine enteignungsrechtliche Vorwirkung einer Plangenehmigung oder eines Planfeststellungsbeschlusses im deutschen Wasserrecht (ähnlich den Möglichkeiten im Bergrecht) der heimischen Rohstoffförderung entgegenkommen würde (E#35MM/A2). Eine Novellierung der Chemikalienverordnung REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) würde den Außenhandel mit Rohstoffen erleichtern (E#21UM/A3). Ein Pfandsystem für beispielsweise Smartphones würde die heimische Kreislaufwirtschaft unterstützen (E#14MM/E). Die grundsätzliche Überprüfung der aktuellen Gesetzeslage auf ihre Zukunftsfähigkeit sowie eine Evaluierung, welche Rohstoffe in Zukunft benötigt werden, ist durch E#31UM/B angemerkt worden.

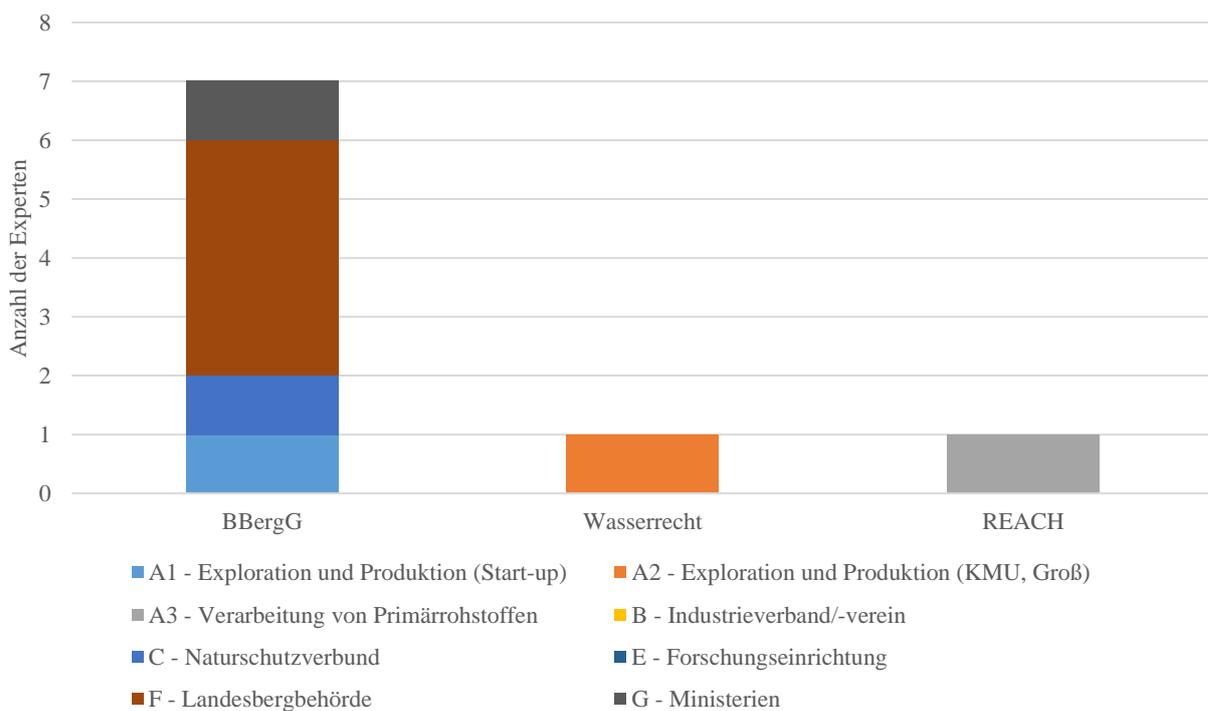


Abbildung 2.16: Ergänzungen zu den Ergebnissen von Frage 2.2, Themenfeld (2) Staat/Regularien.

### Frage 2.3: Was ist Ihre Meinung zur Rohstoffstrategie der Bundesregierung?

Auf die Frage, wie die Meinung zur Neuauflage der Rohstoffstrategie der Bundesregierung aus dem Jahr 2019 ist, sind zehn von 26 Experten aus der Industrie, Naturschutzverbänden und Ministerien, *eher unzufrieden*. Begründet wird dies unterschiedlich. E#21UM/A3 und E#23MM/B erachten die Rohstoffstrategie als zu unkonkret und zu weit gefasst, E#26MM/C fehlt die Festschreibung der Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen in der Rohstoffstrategie. Für E#8GF/D werden die Verantwortlichkeiten für die Rohstoffsicherung nicht klar zugewiesen, E#30GF/D sieht das genau

konträr. Grundsätzlich haben sich elf von 26 Experten dazu geäußert, ob die Verantwortlichkeiten in der Rohstoffstrategie klar zum Ausdruck gebracht werden oder nicht. Für acht von elf Experten ist die Verteilung der Verantwortlichkeit deutlich erkennbar, so z. B. E#9UM/A3 „die Verantwortlichkeiten werden klar dargestellt“ oder E#21UM/A3 „die Pflicht der Rohstoffsicherung liegt klar bei den Unternehmen“. Für drei von elf sind die Verantwortlichkeiten nicht klar geregelt, da beispielsweise „kein gemeinsamer Konsens“ vorliegt (E#8GF/D). Drei von 26 haben die Rohstoffstrategie nicht gelesen, dreien von 26 war die Existenz dieser nicht bekannt. Neun von 26 sind *zufrieden bis eher zufrieden*, davon sind sechs Experten aus Landesbergbehörden und Ministerien (Abb. 2.17). E#31UM/B erachtet die Rohstoffstrategie als wichtiges Werkzeug, das allerdings regelmäßig aktualisiert werden sollte.

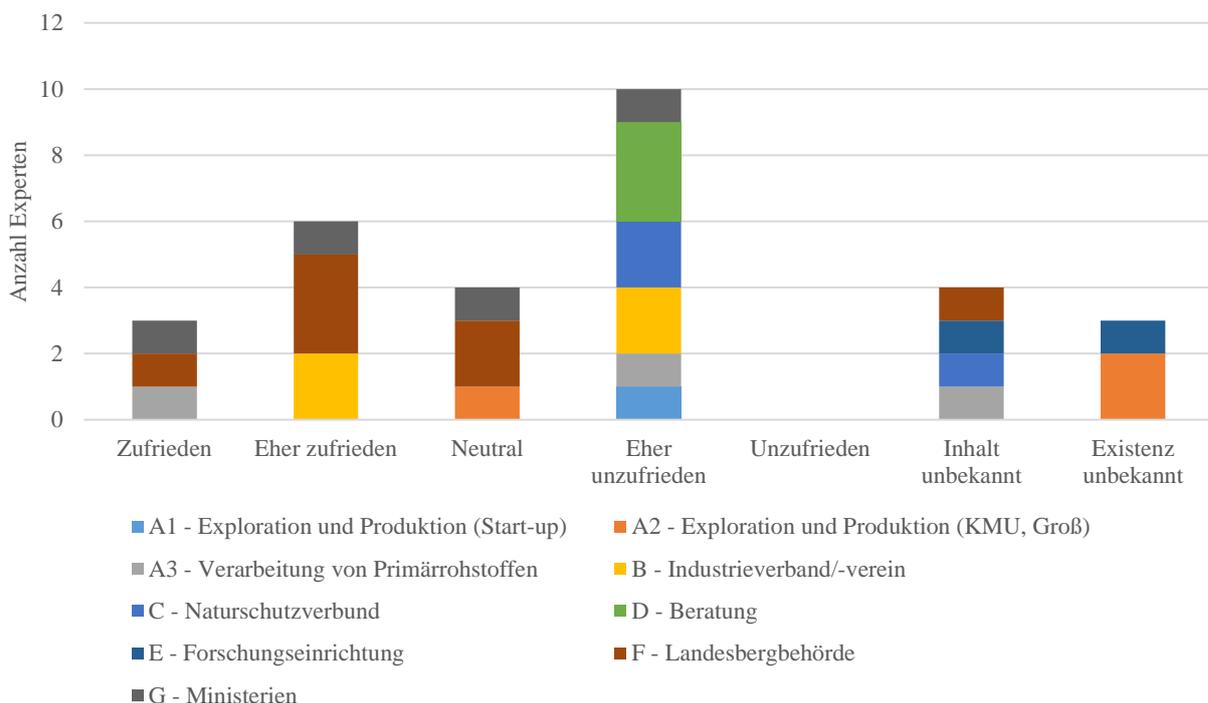
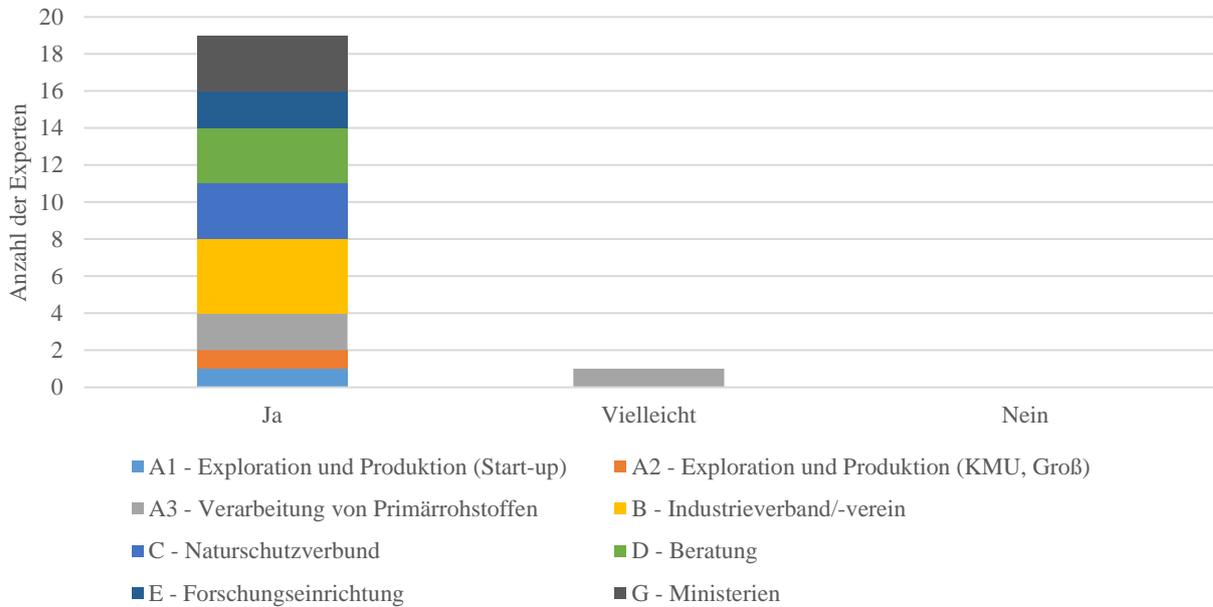


Abbildung 2.17: Interviewergebnisse zu Frage 2.3, Themenfeld (2) Staat/Regularien.

#### Frage 2.4: Wird Ihr Unternehmen/Tätigkeitsbereich/die deutsche Wirtschaft von den Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität betroffen sein?

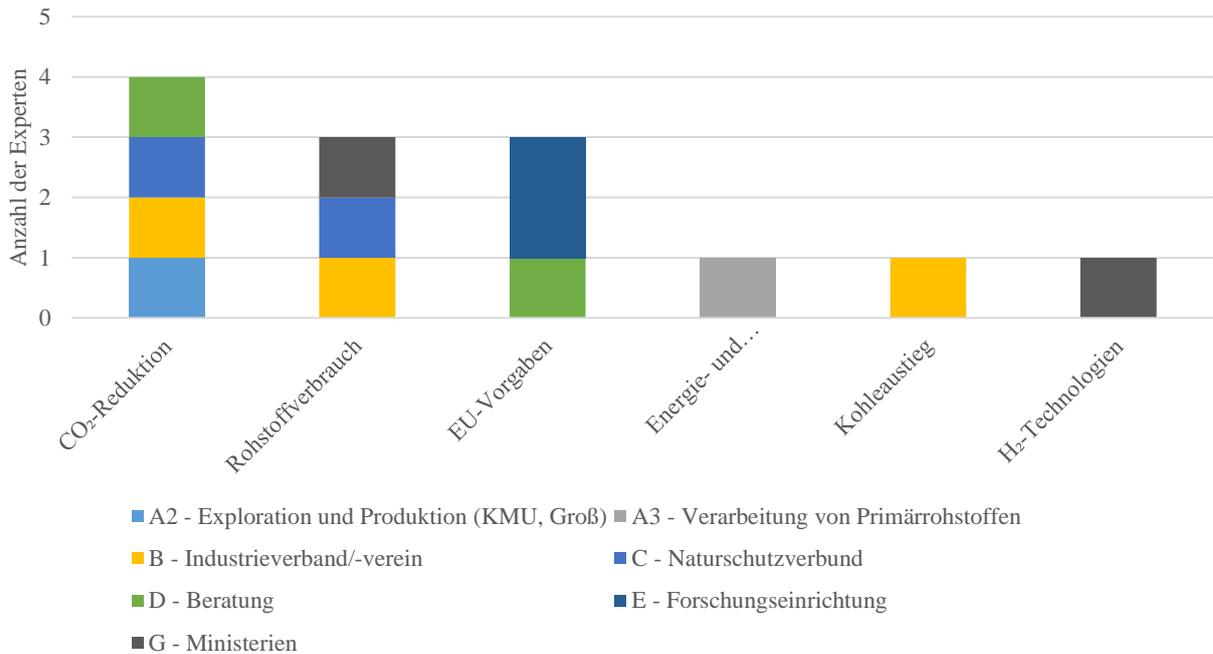
14 von 15 Experten aus der Industrie und Forschungseinrichtungen sind sich sicher, dass ihr Tätigkeitsbereich oder ihr Unternehmen von den Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität betroffen sein wird. E#21UM/A3 ist sich des Ausmaßes für seinen Arbeitgeber noch nicht sicher (Abb. 2.18). E#32UM/B gibt an, dass er Veränderungen in den Geschäftsmodellen der Unternehmen erwartet. E#9UM/A3 beschreibt, dass daran gearbeitet wird, die externen und internen Anforderungen durch eine eigene Nachhaltigkeitsstrategie umzusetzen. E#11GF/B erwartet, dass der Bedarf an und die Abhängigkeit von Technologierohstoffen sich in naher Zukunft ändern werde und dass für den ansteigenden Rohstoffbedarf die „Not in my backyard“-Mentalität hinderlich sein werde. So werde nach E#31UM/B auch eine Rohstoffwende kommen, da der Bedarf an Rohstoffen sich durch neue Technologien hin zu anderen Rohstoffen verschieben werde. Auch die Forschungseinrichtungen sind durch vorgegebene Richtlinien in ihrer Arbeit von der Erreichung der

Klimaziele betroffen. Es ist eine Zunahme an Forschungsfragen bzgl. CO<sub>2</sub>-Reduktionsmaßnahmen bei den zu erforschenden Prozessen zu beobachten (E#14MM/E). Alle sechs Experten aus den Ministerien und Naturschutzverbänden sind sich sicher, dass das Ziel Klimaneutralität Einfluss auf die deutsche Wirtschaft und den Rohstoffbedarf nehmen werde. E#26MM/C sieht nicht, dass „die Wachstumsszenarien (der Wirtschaft) mit den Klimazielen vereinbar sind“. E#33GF/G ist ebenfalls der Meinung, dass zur Erreichung der Klimaneutralität der Rohstoffbedarf gesenkt werden müsste.



**Abbildung 2.18:** Interviewergebnisse zu Frage 2.4, Themenfeld (2) Staat/Regularien.

13 von 20 Experten geben zusätzlich noch Themen an, die als Einflussgröße zur Erreichung der Klimaziele in ihrem Unternehmen bzw. in der deutschen Wirtschaft zu nennen sind (Abb. 2.19). Für vier von 13 ist die CO<sub>2</sub>-Reduktion ein wichtiges Thema, für drei von 13 der Rohstoffverbrauch, also die Rohstoffknappheit und die Verschiebung des Bedarfs an Rohstoffarten, und nochmals für drei von 13 die gesetzlichen Vorgaben der EU. E#9UM/A3 erläutert, dass Maßnahmen zur Energie- und Ressourceneffizienz im Unternehmen umgesetzt werden müssten. E#11GF/B beschreibt, dass der geplante Kohleausstieg 2038 auch beibehalten und nicht vorgezogen werden sollte. E#27GF/G beschreibt, dass die Wasserstofftechnologie als Energiespeicher und Rohstoff bei der Transformation eine bedeutende Rolle spielen werde.



**Abbildung 2.19:** Ergänzung zu den Interviewergebnissen zu Frage 2.4, Themenfeld (2) Staat/Regularien.

Die Herausforderungen, die sich aus den Ergebnissen zum Themenfeld Staat/Regularien ergeben, sind „komplexe Genehmigungsverfahren“ und „Interessenskonflikte“.

### 2.5.3 Zusammenarbeit

#### Frage 3: Wie würden Sie die Zusammenarbeit mit den Landesbergbehörden/mit den Unternehmen beschreiben?

Sechs von zwölf Experten, fünf davon aus den Landesbergbehörden, erachten die Zusammenarbeit zwischen Unternehmen und Landesbergbehörden als *neutral*. Vier von zwölf Experten sehen die Zusammenarbeit *eher positiv* und zwei Experten sehen diese komplett *positiv* (Abb. 2.20). E#2GF/A1 merkt an, dass es regionale Unterschiede gäbe. E#6MM/A2 erkennt an, dass die Landesbergbehörden zwischen den Stühlen mehrerer Akteure säßen. Bei der Befragung zu Herausforderungen gab E#12MM/F an, dass bei der Zusammenarbeit zwischen Unternehmen und Landesbergbehörden sich „die Fronten verhärtet hätten“, was das bisherige professionelle Verhältnis nicht mehr möglich mache.

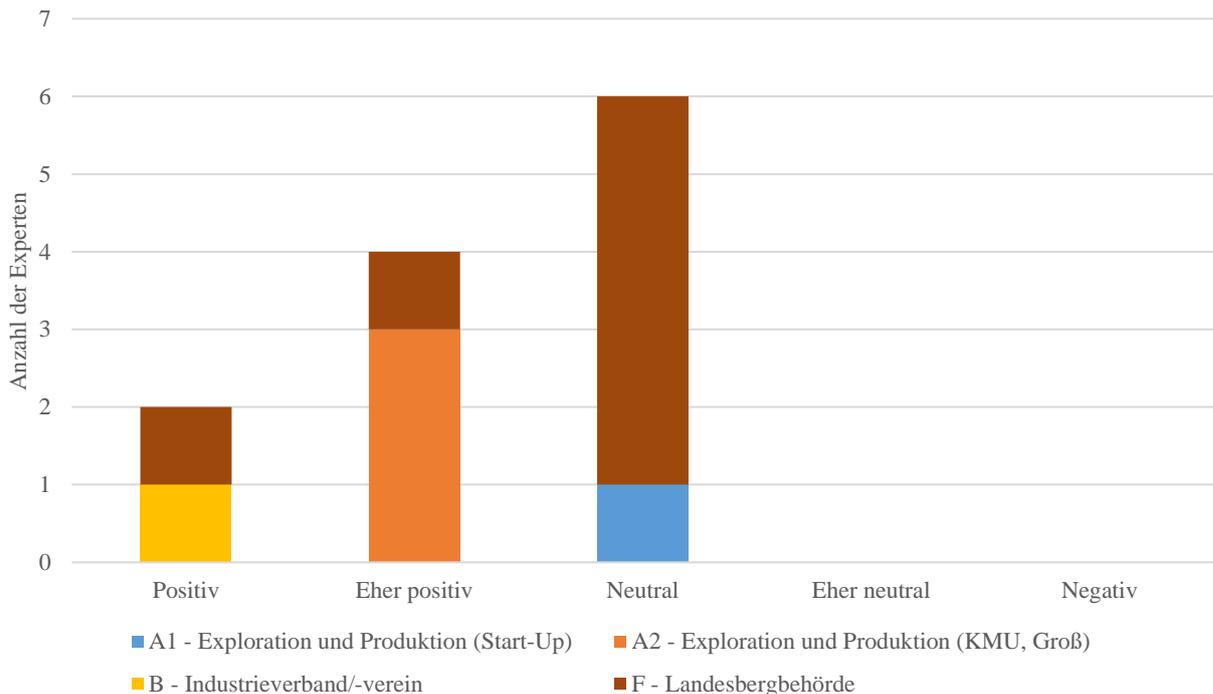


Abbildung 2.20: Ergebnisse zur Frage nach der Zusammenarbeit mit Landesbergbehörden/Unternehmen.

## 2.5.4 Unternehmerische Rohstoffsicherung

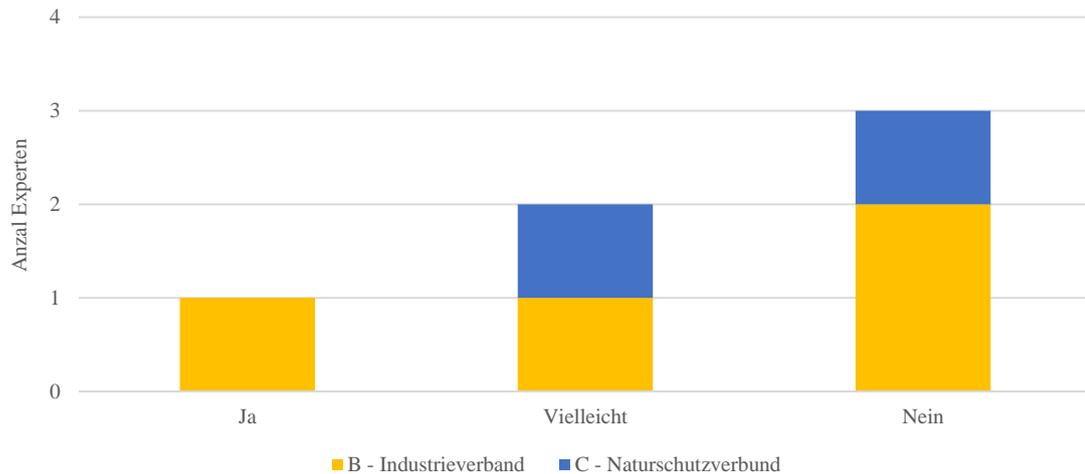
**Frage 4.1: Gab es in Ihrer Zeit Veränderung in der Verfügbarkeit von Rohstoffen für Ihr Unternehmen/die Mitglieder Ihres Verbands?**

**Frage 4.2: Hat Ihr Unternehmen/haben Ihre Mitglieder eine spezifische Strategie zur Sicherung der benötigten Rohstoffe?**

Alle sechs dazu befragten Experten, fünf mit Sitz in Deutschland und ein Experte aus der Schweiz, geben an, dass es in ihrer Tätigkeitszeit bereits zu Veränderungen in der Rohstoffverfügbarkeit komme. Die gleichen Experten geben an, dass ihr Unternehmen bzw. die Unternehmen, die Mitglied in ihrem Verband sind, eigene Strategien zur Sicherung der benötigten Rohstoffe hätten. Diese Veränderungen wurden nach Angaben von E#9UM/A3 jüngst durch die COVID-19-Pandemie ausgelöst. Weitere Ursachen waren in der Vergangenheit gewöhnliche Nachfrage- und Angebotsszenarien (E#18MM/A3), Preisspekulationen (E#21UM/A3), Reservestand von fossilen Brennstoffen und die entsprechenden Explorationszahlen (E#11GF/B) sowie Rohstoffzyklen (E#31UM/B). Als Strategien werden Lieferantendiversifikation (E#9UM/A3), Just-in-time-Produktionsverfahren (E#21UM/A3, E#31UM/B), unternehmensinterne Kreislaufwirtschaft (E#5UM/A3) und Anpassung an die Marktgegebenheiten (E#32UM/B) angegeben. Ob die Unternehmen ihrer Verantwortung, die Rohstoffversorgung sicherzustellen, auch nachkommen, denken die Experten aus den Ministerien, dass dem so sei. Die Unternehmen hätten Instrumente vielfältiger Natur (E#27GF/G), allerdings bräuchten Unternehmen zusätzlich Unterstützung von der öffentlichen Hand (E#25GF/G). Es wird weiter wahrgenommen, dass die Unternehmen linear denken würden und ihre Aktivitäten darauf beruhten, „das existierende Geschäft aufrechtzuerhalten“ (E#33GF/G).

**Frage 4.3: Denken Sie, in Deutschland sollte die Lagerung/Vorhaltung von bestimmten Rohstoffen als Möglichkeit in Betracht gezogen werden?**

Drei von sechs Experten wären gegen ein Vorhaben der Lagerung bzw. Vorhaltung von Rohstoffen. Zwei von drei Experten würden eine Lagerhaltung von den Rohstoffen und Bedingungen abhängig machen (E#31UM/B, E#28UM/C). E#11GF/B sprach sich für eine Rohstofflagerung aus, dieser gab auch an, dass bereits Modellvorschläge der Politik vorgelegt wurden, die eine Lagerung bei den Unternehmen und steuerliche Anreize für diese vorsehen (Abb. 2.21).



**Abbildung 2.21:** Ergebnis Frage 4.3, Themenfeld Rohstoffsicherung.

Auch aus den Ergebnissen des Themenfelds Unternehmerische Rohstoffsicherung kann die „internationale Konkurrenzfähigkeit“ als Herausforderung geschlussfolgert werden.

### 2.5.5 Herausforderungen

Die Experten auf dem heimischen Markt geben insgesamt 27 Herausforderungen an, denen sie sich in der Ausübung ihrer Tätigkeit stellen müssen. Diese lassen sich in vier Bereiche einteilen (Abb. 2.6, Tab. 2.5). Die zehn Meistgenannten sind:

- (1) Fehlende öffentliche Akzeptanz (15 Experten)
- (2) Prozesslaufzeiten dauern zu lange (13 Experten)
- (3) Fachkräftemangel (10 Experten)
- (4) Interessenskonflikte verschiedener Akteure (9 Experten)
- (5) Komplexe Genehmigungsverfahren (7 Experten)
- (6) Einflussnahme von Individuen/Bürgerinitiativen (6 Experten)
- (7) Bürokratischer Aufwand zu hoch (5 Experten)
- (8) Mangel an Fachwissen bei den Behörden (5 Experten)
- (9) Unzureichende Informationsverteilung (4 Experten)
- (10) Politik bezieht nicht mehr klar Stellung (4 Experten)

Die Herausforderung *Fehlende öffentliche Akzeptanz* (15 Experten) wird durch Aussagen aus dem Themenfeld „Wirtschaftsstandort Deutschland“ bekräftigt. Die Herausforderungen *Interessenskonflikte verschiedener Akteure* (9 Experten) und *Komplexe Genehmigungsverfahren* (7 Experten) werden durch Aussagen aus dem Themenfeld „Staat/Regularien“ bestätigt. Des Weiteren lässt sich die Herausforderung *Internationale Konkurrenzfähigkeit* (15 Experten) aus den Ergebnissen zu den Fragen 1.2 und 1.3 aus „Wirtschaftsstandort Deutschland“ ableiten und den 27 Herausforderungen (Tab. 5) in den Bereich „Disziplinübergreifende Herausforderungen“ hinzufügen. Die internationalen Experten geben darüber hinaus noch zwei weitere Herausforderungen an (s. Kap. 4.5.5).

#### 2.5.5.1 Disziplinübergreifende Herausforderungen

Die am häufigsten genannten Herausforderungen lassen sich dem Bereich *disziplinübergreifend* zuordnen (Abb. 2.22). Für 15 von 30 Experten, vor allem aus Industrie, Landesbergbehörden und Ministerien, ist die *fehlende öffentliche Akzeptanz* die bedeutendste Herausforderung. E#19GF/F beschreibt, dass der Druck durch die Öffentlichkeit gestiegen wäre und eine „Not in my backyard“-Mentalität (NIMBY) für Bergbau-Ablehnung und schwierige Projektumsetzungsbedingungen Sorge (E#17UM/F). Für zehn von 30 Experten, aus allen Bereichen kommend, ist der *Fachkräftemangel* hinderlich, so sei es schwierig, Stellen, bei denen fachspezifische akademische Abschlüsse notwendig sind, zu besetzen u. a. auch, weil die Besoldung nicht dem Ausbildungsstand gerecht wird (E#20GF/F). Neun von 30 Experten geben die *unterschiedlichen Interessen verschiedener Beteiligter* bei Projekten zur heimischen Rohstoffförderung an. Die *Einflussnahme von diversen Individuen*, betroffenen Privatpersonen oder Bürgerinitiativen gegen Projekte zur heimischen Erkundung und Produktion erachten sechs von 30 Experten aus Industrie und Landesbergbehörden als Herausforderung. Durch die Beteiligung zu vieler einzelner Interessensvertreter könnten „Verfahren (...) künstlich in die Länge gezogen werden.“ *Unzureichende oder fehlerhafte Informationsverteilung* in der Gesellschaft ist für vier von 30 Experten ein Sachverhalt, der ihre Arbeit erschwere. E#12MM/F bemängelt einen professionellen *Umgang in der Zusammenarbeit* mit

Unternehmen. Auch wird von E#10GF/D angemerkt, dass Deutschland im internationalen Vergleich bei der *digitalen Abwicklung* von Unternehmensabläufen rückschrittlicher sei.

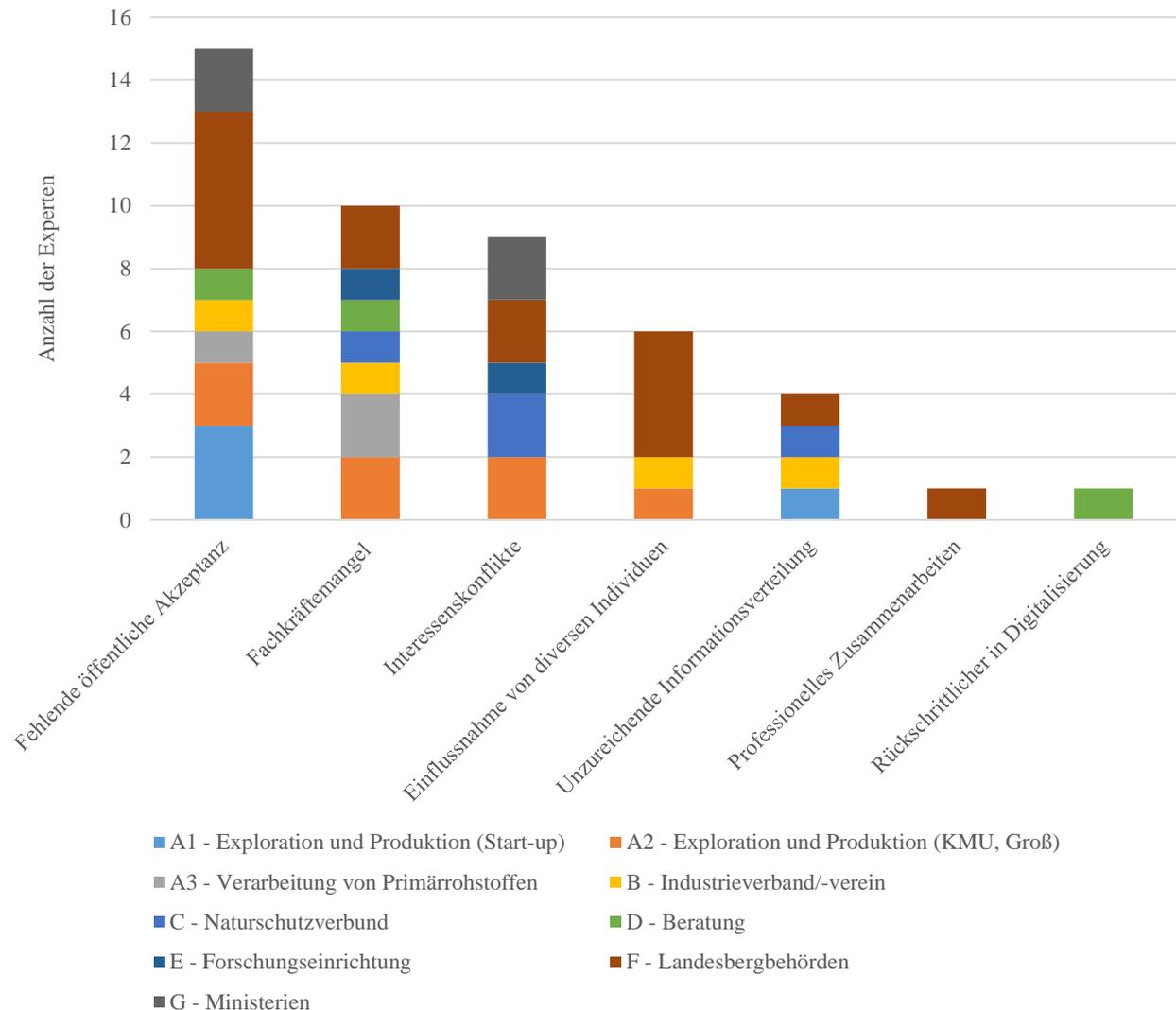
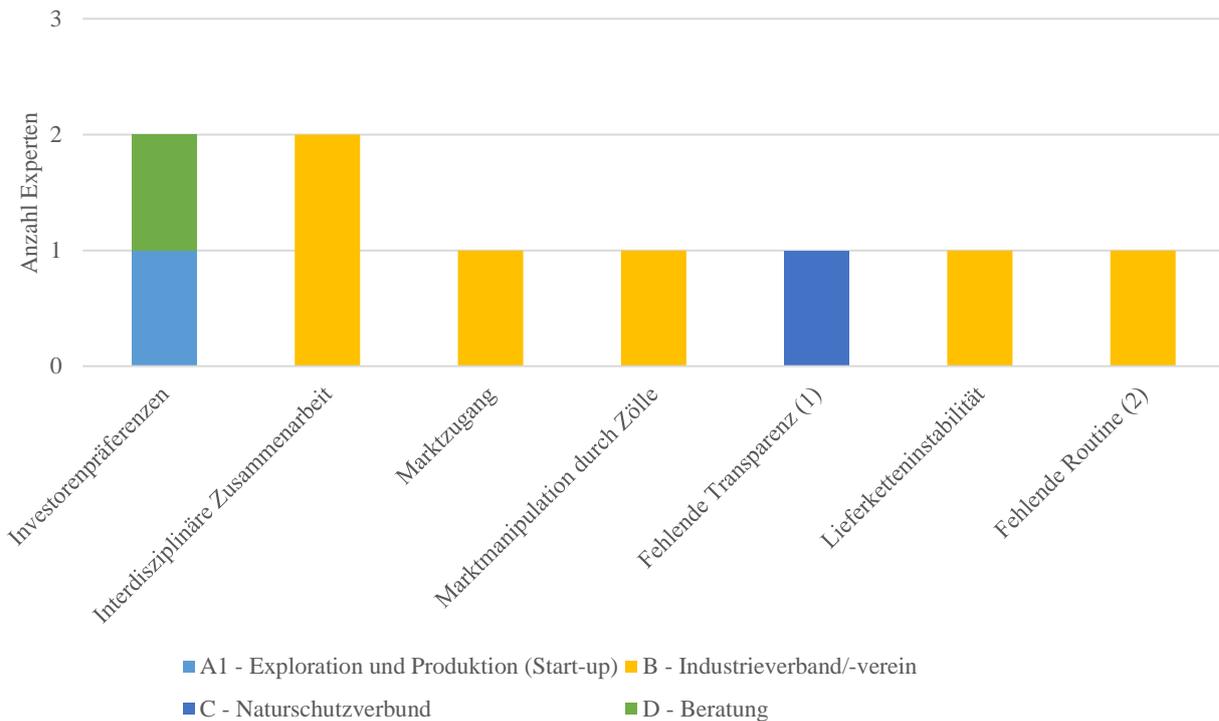


Abbildung 2.22: Ergebnisse „Disziplinübergreifende Herausforderungen“.

### 2.5.5.2 Herausforderungen Unternehmen oder die Wirtschaft betreffend

Als *Unternehmen und Wirtschaft betreffende Herausforderungen* geben zwei von 30 Experten die zu ausländischen Projekten abweichenden *Investorenpräferenzen* und die grundsätzliche Schwierigkeit der Kapitalbeschaffung an. E#31UM/B empfindet den *Zugang zum Rohstoffmarkt* sowie die *Lieferketteninstabilität* als Herausforderung (Abb. 2.23). E#32UM/B gibt an, dass *Marktmanipulationen* durch Zölle hinderlich seien. Zwei von 30 Experten sind der Ansicht, dass die mangelnde Fähigkeit *interdisziplinär kontinuierlich zusammenzuarbeiten* innerhalb der Unternehmen, aber auch zwischen Unternehmen und Behörden, zusätzliche Schwierigkeiten aufbaue (E#23MM/B, E#31UM/B). E#28UM/C bemängelt die *Transparenz von Unternehmen zu Daten über Rohstoffabbau und -verbrauch*. Auch die *mangelnde Routine der Unternehmen in Genehmigungsprozessen* beschere unterschiedliche Herausforderungen, beispielsweise müssten Unternehmen in bestimmten Fällen externe Berater hinzuziehen, die teilweise ausgebucht seien und entsprechende Wartezeiten bedingen würden (E#23MM/B).



**Abbildung 2.23:** Ergebnisse „Herausforderungen Unternehmen oder die Wirtschaft betreffend“. (1) Fehlende Transparenz von Unternehmen zu Rohstoffzahlen, (2) Fehlende Routine in Genehmigungsprozessen.

### 2.5.5.3 Herausforderungen administrative Abläufe und Behörden betreffend

Sechs Herausforderungen wurden explizit bezogen auf *administrative Abläufe und Behörden* genannt (Abb. 2.24). Zehn von 30 Experten sagen, dass die *administrativen Prozessabläufe* speziell bei Genehmigungsverfahren zu lange dauern würden. Laut E#19GF/F benötige „die Behörde (...) mehr Zeit, um die Verfahren vollumfänglich vorzubereiten und durchzuführen“. Von E#35MM/A2 wurde angegeben, dass beispielsweise Regionalplanverfahren sich auch auf zehn Jahre ausweiten können. Verhandlungen mit Grundstückseigentümern können je nach Situation zwischen drei Monaten und 30 Jahren dauern, was folglich Verfahren in die Länge ziehen und weitere zum gleichen Verfahren zugehörige Genehmigungen beeinträchtigen kann. Fünf von 30 Experten erachteten den *bürokratischen Aufwand* als zu hoch, dies behindere nach Aussage von E#11GF/B die Effizienz von Projekten und senke dementsprechend die Wirtschaftlichkeit. E#35MM/A2 merkte weiter an, dass teilweise die *Ansprechpartner in den Behörden* zu gering ausgebildet seien bzw. es zu wenige Ansprechpartner gäbe. Fünf von 30 Experten aus der Industrie und von Naturschutzverbänden bemängelten das *Fachwissen in den Behörden* durch u. a. zu wenig Fachpersonal und weitere 3, einer davon selbst aus einer Behörde, die *hohe Fluktuation* in diesen. Durch den anstehenden Generationenwechsel befürchteten E#11GF/B und E#16GF/F einen erheblichen *Wissens- und Kompetenzverlust* bei den entsprechenden Stellen.

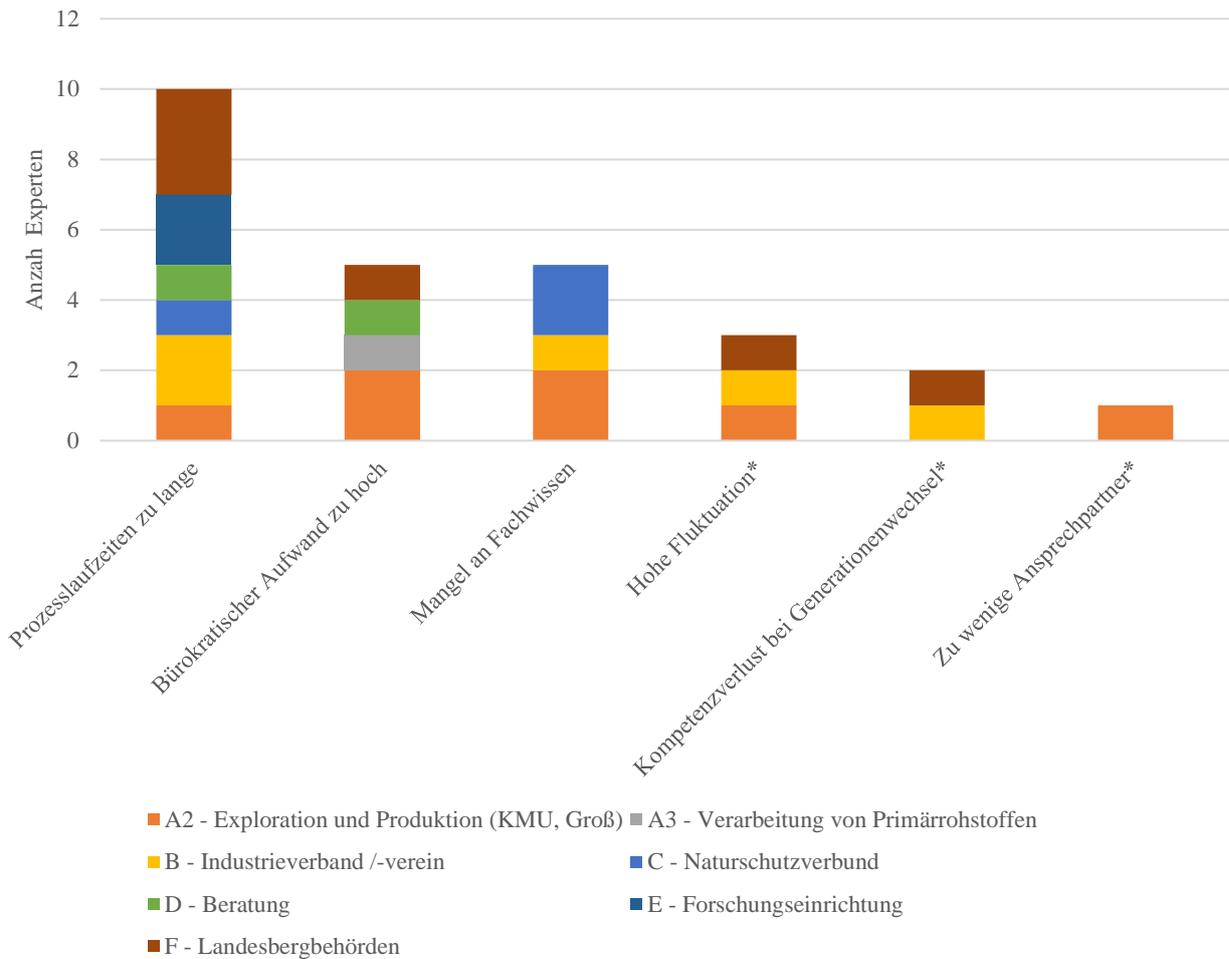


Abbildung 2.24: Ergebnisse „Herausforderungen administrative Abläufe und Behörden betreffend“. \* in den Behörden.

#### 2.5.5.4 Herausforderungen die Politik und Gesetzgebung betreffend

Als die größte *Herausforderung betreffend Politik und Gesetzgebung* wird von sieben von 30 Experten *komplexe Genehmigungsverfahren* genannt (Abb. 2.25). E#23MM/B ist der Meinung, dass die erreichte Komplexität bereits Verfahren bzw. Projekte vorab infrage stellen würde und teilweise „öffentliche Belange benutzt werden, um individuelle Interessen durchzusetzen“. E#19GF/F gibt zur Erläuterung an, dass die wenigsten ohne Gerichtsverfahren abgewickelt werden könnten. E#6MM/A2 und E#11GF/B fügen dem hinzu, dass Sachverhalte juristisch aufwendig aufgearbeitet werden würden bzw. juristische Maßnahmen durchgeführt werden würden, welche Projekte verzögern, was wiederum die Wirtschaftlichkeit senke. *Hohe Standards* stünden raschen Genehmigungsprozessen gegenüber (E#10GF/D), bedeuteten weitere Investitionskosten bei den Unternehmen (E#16GF/F) oder einen höheren Zeitaufwand bei den Behörden, diese zu prüfen (E#19GF/F). Vier weitere Experten sehen es als herausfordernd an, dass die *Politik nicht mehr klar Haltung* zur Rohstoffförderung in Deutschland beziehe. Der *Föderalismus* und ein schlechter *Zugang zu Ministerien* wurden jeweils von einem Experten als Einschränkungen angegeben (E#15GF/F; E#26MM/C).

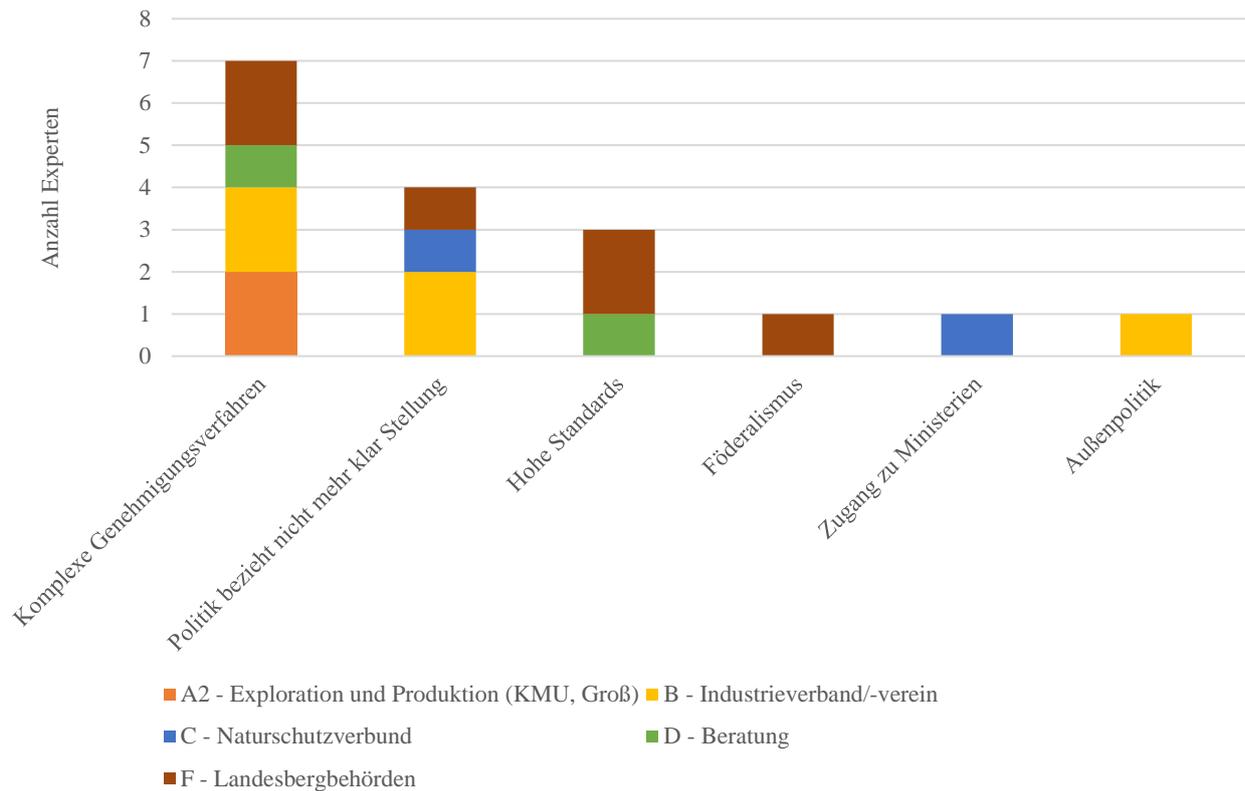


Abbildung 2.25: Ergebnisse „Herausforderungen die Politik und Gesetzgebung betreffend“.

### 2.5.5.5 Herausforderungen aus Sicht der internationalen Experten

In den Interviews mit den international tätigen Experten E#3GF/A1, E#4GF/A1 und E#34GF/A1 aus der Kategorie Exploration und Produktion (A1) werden ebenfalls Herausforderungen genannt, die für die Exploration und Produktion von Rohstoffen in Deutschland gesehen werden. Alle nennen zu *lange Prozesslaufzeiten*, zwei von drei die *fehlende öffentliche Akzeptanz* und E#34GF/A1 die *Zusammenarbeit mit deutschen Behörden* als herausfordernd (Abb. 2.26). Für den internationalen Experten aus dem verarbeitenden Gewerbe in der Schweiz (E#5UM/A3) stellt das schweizerische Lieferkettengesetz eine Hürde dar und er sieht vergleichbare Herausforderungen für das verarbeitende Gewerbe in Deutschland aufkommen.

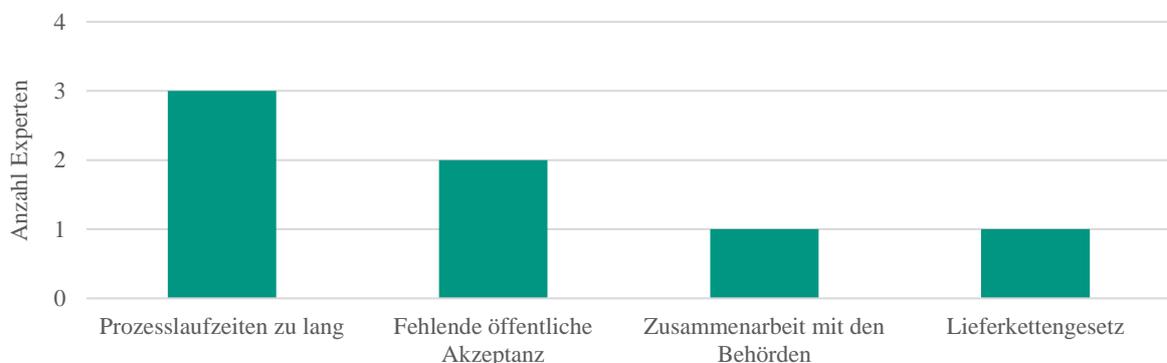


Abbildung 2.26: Herausforderungen für die Rohstoffversorgung in Deutschland aus Sicht der internationalen Experten aus den Kategorien A1 und A3.

**Tabelle 2.5:** Übersicht der genannten Herausforderungen der Experten. Experten #3, 4, 34 und 5 sind internationale Experten.

Expertenkategorie	A1				A2			A3				B				C			D			E		F						G							
	2	3	4	34	6	22	35	9	18	21	5	11	23	31	32	26	28	29	8	10	30	7	14	12	13	15	16	17	19	20	24	25	27	33			
<b>Disziplinübergreifende Herausforderungen</b>																																					
Internationale Konkurrenzfähigkeit	x				x		x		x			x		x	x			x	x	x		x	x			x		x		x							
Fehlende öffentliche Akzeptanz	x		x	x	x		x		x				x							x				x	x		x	x		x		x	x				
Fachkräftemangel					x		x	x		x					x						x	x					x			x							
Interessenskonflikte						x	x									x		x					x			x							x	x			
Einflussnahme von diversen Individuen/ Bürgerinitiativen							x						x											x	x			x			x						
Unzureichende Informationsverteilung	x												x			x													x								
Umgang/ professionelles Zusammenarbeiten																								x													
Rückschrittlich in Digitalisierung																																					
<b>Herausforderungen für Unternehmen und Wirtschaft</b>																																					
Finanzen: Investorenpräferenzen/ Kapitalbeschaffung	x																																				
Interdisziplinäre Zusammenarbeit schwierig													x	x																							
Marktzugang schwierig														x																							
Marktmanipulation															x																						
Fehlende Transparenz von Unternehmen zu Rohstoffzahlen																	x																				
Lieferketteninstabilität														x																							
Keine Routine in Genehmigungsprozessen														x																							



**Tabelle 2.6:** Übersicht der Bewertung der Expertenantworten der in Kapitel 2.5 in die Auswertung einbezogenen Fragen. Die Auflistung der Fragen ist im Anhang 7.2 in Tab. 7.1 zu finden.

Frage	Bewertung der Antworten					Erweiterung im Interview		Anzahl Experten
<b>1. Wirtschaftsstandort Deutschland</b>								
1.1 Sehen Sie für Ihr Geschäftsmodell eine Zukunft in Deutschland/Europa? Würden Sie Deutschland als Explorations-Standort eine wachsende Bedeutung zuweisen?	Optimistisch	Eher optimistisch	Neutral	Eher pessimistisch	Pessimistisch			
	1	0	5	3	4			13
1.2 Wie sehen Sie die Rolle der deutschen Wirtschaft bei der Beschaffung der Rohstoffe im globalen Kontext?	Positiv	Eher positiv	Neutral	Eher negativ	Negativ			
	0	4	11	9	6			30
1.3 Hat die Ausrichtung der Rohstoffsicherung einen Einfluss auf die internationale Konkurrenzfähigkeit Deutschlands?	Ja		Neutral		Nein			
	18		0		0			18
<b>2. Staat / Regularien</b>								
2.1.1 Sollte der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage eine Rolle haben?	Ja		Neutral		Nein			
	23		2		1			26
2.1.2 Wenn ja, welche Rolle sollte er übernehmen?	Beschreibung der Rolle							
2.2 Gibt es ausreichende staatliche Regularien im Bereich der Rohstoffbeschaffung?	Ja		Ja, aber Anpassungen wären wünschenswert.		Nein			
	12		11		4			27
2.3 Was ist Ihre Meinung zu Veröffentlichungen der Regierung wie beispielsweise der Rohstoffstrategie?	Zufrieden	Eher zufrieden	Neutral	Eher unzufrieden	Unzufrieden	Inhalt unbekannt	Existenz unbekannt	
	3	6	4	10		4	3	30
2.4 Wird Ihr Unternehmen/Tätigkeitsbereich/die deutsche Wirtschaft von den Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität betroffen sein?	Ja		Vielleicht		Nein			
	19		1					20
<b>3. Zusammenarbeit</b>								
3. Wie würden Sie die Zusammenarbeit mit den Landesbergbehörden/mit den Unternehmen beschreiben?	Positiv	Eher positiv	Neutral	Eher neutral	Negativ			
	2	4	6					12
<b>4. Rohstoffsicherung</b>								
4.1 Gab es in Ihrer Zeit Veränderungen in der Verfügbarkeit von Rohstoffen für Ihr Unternehmen/die Mitglieder Ihres Verbands?	Ja				Nein			
	6				0			6
4.2 Hat Ihr Unternehmen/haben Ihre Mitglieder eine spezifische Strategie zur Sicherung der benötigten Rohstoffe?	Ja				Nein			
	6				0			6
4.3 Denken Sie, in Deutschland sollte die Lagerung/Vorhaltung von bestimmten Rohstoffen als Möglichkeit in Betracht gezogen werden?	Ja		Vielleicht		Nein			
	1		2		3			6
<b>5. Herausforderungen</b>					Benennung der Herausforderungen			34

## 2.6 Diskussion

### 2.6.1 Rohstoffversorgung für den Wirtschaftsstandort Deutschland

Nach Ansicht der interviewten Experten aus dem Bereich Exploration und Produktion (Kategorien A2, B und D) sei ein Bergbau in Deutschland aufgrund mangelnder Akzeptanz ein wenig zukunftssträchtiges Gebiet. Der deutsche Bergbau werde „nur noch als historisches Thema wahrgenommen“ und sei „nicht als aktiver Wirtschaftszweig präsent“ (E#17UM/F). Dies kann sich negativ auf die Versorgungssicherheit des Landes auswirken und erschwert die Attraktivität für qualifiziertes Personal und die Besetzung benötigter Fachpositionen. Experten aus dem verarbeitenden Gewerbe und den Ministerien sind neutraler gestimmt und unterscheiden bei der Bewertung des deutschen Bergbaus nach Rohstoffart. Sie sehen eine geringere Problematik hinsichtlich vorhandenem Fachwissen, das zu einer verantwortungsvollen Strategie zur Erkundung und Nutzung heimischer Ressourcen beitragen könne.

Dies kann dadurch bestätigt werden, dass neue Technologien für umweltschonenderen Bergbau im In- und Ausland entwickelt werden. Das unternehmerische Engagement zur Erschließung inländischer Rohstoffe, wie beispielsweise bei der neuartigen Lithiumgewinnung aus Geothermalwässern im Oberrheingraben und andernorts, bietet neue Möglichkeiten, Lieferketten durch die heimische Rohstoffförderung zu diversifizieren. Mit einer geplanten jährlichen CO<sub>2</sub>-freien Produktion von maximal 40.000 t Lithiumhydroxid (LiOH) könnten ein Beitrag zur Klimaneutralität geleistet und gleichzeitig neue Technologien für eine nachhaltigere Rohstoffgewinnung entwickelt werden (VER, 2022d). Ebenso können weitere Projekte der Metallgewinnung, wie beispielsweise die seit 2011 in Zinnwald-Georgenfeld im Erzgebirge erkundete Lithium-Zinn-Wolfram-Lagerstätte, die erkundete Kupferlagerstätte bei Spremberg in Brandenburg und andere Aktivitäten zur Versorgungssicherheit durch heimische Rohstoffe beitragen (Deutsche-Lithium, 2021; BGR, 2021).

Neben den inländischen Rohstoffversorgungsmöglichkeiten ist die deutsche Industrie auch in Zukunft auf metallische Rohstoffe, Industrieminerale, Kohlenwasserstoffe als Energierohstoffe und für die stoffliche Nutzung sowie Wasserstoff aus dem Ausland angewiesen (acatech, 2017; Marscheider-Weidemann, 2021; IEA, 2020). Durch das Engagement deutscher Firmen im Ausland, wie z. B. bei der Lithiumgewinnung aus Salzseen, werden neue ressourcenschonende Technologien entwickelt und angewendet, die zur Rohstoffsicherung für Deutschland beitragen könnten (ACISA, 2021; Bardt und Hübner, 2018). Die Säule „Importe“ der Rohstoffversorgung in Deutschland wird zwar durch bilaterale Verträge gestärkt, insbesondere durch die sich die deutsche Großindustrie mit Unternehmen der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung Rohstoffe direkt sichert (vgl. BMW Group, 2021), allerdings müssen Unternehmen, vor allem des Mittelstands, die auf ausländische Rohstoffzulieferer angewiesen sind, auf weltweite Lieferengpässe reagieren können (Abel-Koch, 2021).

Die Experten nehmen wahr, dass die eher passive internationale deutsche Rohstoffpolitik sich stark von den aktiven staatlichen Maßnahmen anderer Industrienationen wie Südkorea, Japan und den USA unterscheidet (Lee und Cha, 2020; METI, 2020; Hilgers et al., 2021). Die Hälfte der befragten

Experten sieht dadurch die Stellung Deutschlands im internationalen Vergleich geschwächt. Ein gutes Drittel der zur internationalen Konkurrenzfähigkeit befragten Experten stellt das heimische geologische Potenzial und die ansässige Fachkompetenz in den Vordergrund und sieht die Position Deutschlands daher eher neutral im globalen Vergleich. Im Gegensatz zu Deutschland hat China sich durch seine „Going Global“-Strategie und durch die „Belt and Road Initiative“ global so positioniert, dass nicht nur Infrastrukturprojekte, sondern auch Lagerstätten und Bergbauprojekte auf allen Kontinenten mit chinesischer Beteiligung umgesetzt und weiter ausgebaut werden (Farooki, 2018; Farooki, 2018a; OECD, 2018; Ericsson et al., 2020). Des Weiteren ist China in der Lage, durch die geologische Verfügbarkeit diverser Metalle und Industriemineralien im Land selbst sowie den Aufbau einer eigenen Raffinadeproduktion, global Teile der Rohstoffmärkte lenken zu können (Schüler-Zhou et al., 2019). Die Rohstoffpolitik in China ist in mehreren Ministerien eingebettet und wird so aus verschiedenen Richtungen vorangetrieben (Schüler-Zhou et al., 2019). Auch in den USA beschäftigen sich verschiedene Ministerien mit der Rohstoffsicherung, u. a. das Verteidigungsministerium, das Ministerium für Energie und auch das Handelsministerium. Verschiedene Strategien zur Sicherung von kritischen Rohstoffen, insbesondere von Metallen, für die Erneuerbaren Energien und strategisch wichtige Wirtschaftsbereiche sind beschlossen worden (U.S. Department of Energy, 2011; U.S. Department of Commerce, 2019). Außerdem betreibt die USA Rohstoff-Lagerhaltung und gibt diese Mengen in ihrem jährlichen Rohstoffbericht bekannt (USGS, 2021).

Die deutsche Rohstoffstrategie wird aus dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geplant und gesteuert, sie konzentriert sich auf die Stärkung aller drei Säulen der Rohstoffbeschaffung (heimische Förderung, Kreislaufwirtschaft und Importe). Wenn auch Innovationen in ressourcenschonenden Technologien für Exploration, Gewinnung, Raffination und dem Recycling gefördert werden, kann dies zu einer resilienten Rohstoffversorgung in Deutschland beitragen.

### **2.6.2 Rolle des Staates und Maßnahmen der Rohstoffstrategie**

Die Mehrheit der Experten ist der Ansicht, dass der Staat eine Rolle bei der Rohstoffversorgung einnehmen sollte. Diese sollte sich unterstützend auswirken und Rahmenbedingungen setzen. Durch diverse Gesetze wie dem Bundesberggesetz BBergG (neueste Fassung 2021) oder dem Bundesimmissionsschutzgesetz (neueste Fassung 2020) legt die Legislative einen Rahmen für den heimischen Rohstoffabbau (BdJ, 2020, 2021). Die Mehrheit der befragten Experten erwartet stärker unterstützende Rahmenbedingungen des Gesetzgebers, die jedoch individuell definiert werden. So wünschen die einen einfachere Verfahren bis zur Erlaubnis zur Rohstoffgewinnung, während andere Experten mehr Kontrolle hinsichtlich eines nachhaltigeren Umgangs mit natürlichen Ressourcen und die Einführung realistischer Bedarfsrechnungen von mineralischen Rohstoffen fordern. Der Rohstoffversorgung und dem wirtschaftlichen Wachstum stehen Aspekte wie die „Not in my backyard“-Mentalität (NIMBY), Klimaschutz und Ressourcenschonung gegenüber. Diese kontroverse Meinungslage kommt auch in der Haltung der unterschiedlichen Bundestagsparteien zum Entwurf der Änderung des BBergG vom April 2021 zum Ausdruck (Deutscher Bundestag, 2021). Das Zusammenführen der verschiedenen Aspekte für eine allumfassend nachhaltige Zukunft bleibt eine stetige Aufgabe.

Verschiedene Themenbereiche, um die der Gesetzgeber sich verstärkt kümmern sollte, wurden von den Experten benannt. Aus der Exploration und Produktion (Kategorie A1, A2, B) und den Landesbergbehörden wurde der Wunsch nach stärkerer Unterstützung der heimischen Förderung geäußert. Landesbergbehörden wie auch das verarbeitende Gewerbe regten an, deutsche Unternehmen, die im ausländischen Bergbau tätig sind bzw. sein wollen, zu unterstützen (E#21UM/A3; E#12GF/F). Dies wurde zwischen 2013 und 2015 in der Form eines Explorationsförderprogramms durch die Regierung umgesetzt. Nachdem es zwischen 1972 und 1990 bereits ein Explorationsförderprogramm gab, wurde ein weiteres Programm im Zuge der ersten Rohstoffstrategie (2010) der Bundesregierung 2013 etabliert (BMW, 2010). Dies beinhaltete „bedingt rückzahlbare Darlehen“ für Rohstoffexplorationsprojekte im Ausland von Unternehmen mit Sitz in Deutschland und sollte dabei besonders die von der EU als kritisch bewerteten nicht-energetischen mineralischen Rohstoffe berücksichtigen (BMW, 2010; BMW, 2019). Das Programm wurde jedoch auf Empfehlung des Bundesrechnungshofes aufgrund mangelnder Nachfrage und unzureichender technischer und wirtschaftlicher Voraussetzungen der Unternehmen, die sich darum bewarben (in Summe lediglich 15), im Dezember 2015 wieder eingestellt (Bundesrechnungshof, 2015). Gründe des geringen Engagements waren die niedrigen Rohstoffpreise, der volatile und kapitalintensive Bergbau sowie mangelndes Wissen aufgrund der 1993 bis 2002 geschlossenen international tätigen Unternehmen des Metallbergbaus (acatech, 2017; Hilgers et al., 2021). Eine weitere unterstützende und noch bestehende Maßnahme des Staates sind die ungebundenen Finanzkredit-Garantien (UFK-Garantien). Durch diese werden Rohstoffvorhaben gegen wirtschaftliche und politische Ausfallrisiken abgesichert, im Gegenzug sollen Abnahmeverträge die Rohstoffsicherung in Deutschland unterstützen (BMW, 2019). Seit Bestehen der UFK-Garantien (1961) wurden Kredite an 38 Projekte mit Bezug zum Rohstoffsektor vergeben, monetär betrachtet floss dabei der größte Anteil (80 %, ca. 6,5 Mrd. EUR) in Projekte mit Kupfer-, Erdgas-, Eisen- und Eisenerzbezug (Deutscher Bundestag, 2020). Bis auf eines dieser Projekte wurden alle abgeschlossen (Deutscher Bundestag, 2020). Die Projektgesellschaft, welche die höchste Kreditsumme nach der Bedingungsreform der UFKs 2009 erhielt, war mit knappen 2,3 Mio. EUR die Nord Stream AG (Deutscher Bundestag, 2020).

Einige Experten sprechen eine deutlichere Vertretung des Themas Rohstoffe in der Außenpolitik sowie einen stärkeren Nachhaltigkeitsgedanken durch den Staat an. Diese beiden Bereiche werden durch Maßnahmen wie dem Vorhaben zur Erarbeitung eines internationalen Leitfadens zur ökologischen Sorgfaltspflicht in Rohstofflieferketten (Maßnahme 15) oder die Unterstützung des Internationalen Forums für Bergbau, Minerale, Metalle und nachhaltige Entwicklung (Maßnahme 16) in der Rohstoffstrategie (2019) zusammengeführt (BMW, 2019). Die Verankerung des Themas Rohstoffe in der Außenpolitik geschieht durch Vereinbarungen über Rohstoffpartnerschaften und Absichtserklärungen mit rohstoffreichen Ländern und wird durch die Unterstützung der Vorhaben auf EU-Ebene wie beispielsweise die Unterstützung der gegründeten Rohstoffallianz weiter gefestigt (Maßnahme 17) (BMW, 2010; BGR, 2020; EU-Kommission, 2020a; BMW, 2019). Ob Projekte der deutschen Wirtschaft, die durch außenwirtschaftliche Maßnahmen unterstützt werden, in direktem Zusammenhang mit bestehenden Rohstoffpartnerschaften stehen, kann von der Regierung nicht benannt werden (Deutscher Bundestag, 2020a).

Die aktualisierte deutsche Rohstoffstrategie (2019) belegt, dass die Regierung diverse Wege benennt, um die Rohstoffversorgung in Deutschland sicherzustellen. Die Unbekanntheit der

deutschen Rohstoffstrategie unter den Experten lässt allerdings darauf schließen, dass die staatlichen Bemühungen zur Rohstoffsicherung nicht alle Adressaten erreicht oder nicht die Interessen der Privatwirtschaft bedient. Einigkeit herrscht zwischen der Bundesregierung und der Industrie in dem Punkt, „dass es grundsätzlich Aufgabe der Wirtschaftsunternehmen ist, ihre Rohstoffversorgung sicherzustellen“ (BMW, 2019). Dass 2021 vom BMW eine Broschüre „Bergbau, Recycling, Ressourceneffizienz“ publiziert wurde, verdeutlicht, dass das Thema Rohstoffversorgung bei der Regierung an Bedeutung gewonnen hat. Eine stärkere Intervention des Staates, die über die Legislative hinausginge, ist von keinem Experten explizit genannt worden. Diese sollte sich auf die Förderung von Innovation und neuen Technologien beschränken (Tilton et al., 2018).

### 2.6.3 Faktenbasierte Zusammenarbeit

Bei der Frage nach der Zusammenarbeit zwischen Unternehmen und Landesbergbehörden wurde von einem Experten eine Abnahme im professionellen Umgang genannt. Durch gezieltes Nachfragen konnte dies allerdings bei zwölf weiteren Experten nicht bestätigt werden. Gewünscht wurde jedoch ein weniger ideologischer und stattdessen faktenbezogener und sachlicher Umgang auf allen Ebenen und bei allen Interessensvertretern (E#13GF/F, E#29MM/C, E#12MM/F). Durch das BBergG wird eine zweckorientierte Zusammenarbeit vorgegeben. Ob politische Vorgaben, eine mangelnde Personaldecke oder die mangelnde Verfügbarkeit qualifizierten Personals die Effizienz von Verfahren einschränken, konnte nicht eruiert werden. Die Zusammenarbeit der Naturschutzverbände mit Behörden verläuft über Austauschgremien, bei Veranstaltungen oder über gezielte Kooperationen.

### 2.6.4 Globale Rohstoffbeschaffung der Industrie

Jeder Experte aus der rohstoffverarbeitenden Industrie konnte bestätigen, dass auf Auswirkungen globaler Verstrickungen, die die Rohstoffbeschaffung betreffen, bereits in den Unternehmen reagiert werden musste. Ebenso habe jedes Unternehmen seine eigene Strategie zur Rohstoffbeschaffung und -sicherung, die tatsächlichen Strategien wurden nicht näher erläutert. Die Rohstoffmärkte sind seit jeher global aufgestellt und werden von Angebot und Nachfrage, geopolitischen Umständen und naturbedingten Ereignissen gelenkt (Petrascheck und Pohl, 1982; Tiess, 2009; Dannreuther, 2013). Die Ursache des derzeitigen Rohstoffmangels ist vielfältig, wie beispielsweise die gegenwärtige Lage in China aufzeigt. Pandemiebedingt schließen chinesische Häfen, gleichzeitig wurden die Exporte von Magnesium für Aluminiumlegierungen eingestellt, was offiziell mit der Erreichung von Emissionsreduktionszielen begründet wurde (Rohde, 2021; Thürmer und Schuster, 2021). Auch bekannt ist allerdings, dass es aufgrund eines erhöhten Strombedarfs in China zu Stromausfällen gekommen ist, die sich auch auf industrielle Anlagen auswirkten (DERA, 2021a). Ein Zurückfahren von Steinkohlekraftwerken wird wiederum in Verbindung mit einem seit 2020 bestehenden inoffiziellen Embargo Chinas gegen australische Steinkohle gebracht (Reuters, 2021).

Auch wurde von den Experten geäußert, dass die Unternehmen „Instrumente vielfältiger Natur“ hätten, um die benötigten Rohstoffe zu sichern (E#27GF/G). Die von Inverto (2020) durchgeführte

Rohstoffstudie ergab Rohstoffsicherungsstrategien, die sich in den Punkten Lieferantendiversifikation und Anpassung an die Marktgegebenheiten mit den Antworten der Experten aus dieser Studie überschneiden. Die befragten 87 Geschäftsführer, Vorstände und Entscheidungsträger gaben des Weiteren die Analyse der Wertschöpfungskette und die Optimierung der Lagerbestände an (Inverto, 2020). Um volatile Rohstoffpreise abzufedern, werden Vereinbarungen mit langfristigen Festpreisen und Preisgleitklauseln festgelegt, die Möglichkeit zur Reduktion des Materialeinsatzes wird ebenfalls als sinnvolle Maßnahme des Rohstoffmanagements angesehen (Inverto, 2020). Die aktuelle kritische Lage mancher Rohstofflieferketten für Unternehmen in Deutschland lässt infrage stellen, ob die bisherigen unternehmerischen und durch den Gesetzgeber etablierten Maßnahmen ausreichend gewesen sind und grundsätzlich die richtigen Maßnahmen eingeleitet wurden (Schuppert, 2021; Maihold und Mühlhöfer, 2021). Schmid (2020) beschreibt aus der Perspektive des strategischen Managements unterschiedliche unternehmerische Rohstoffstrategien und zeigt auf, dass Wahl und Anwendung der Strategie wie beispielsweise Recycling oder Hedging über Dauerhaftigkeit und Erfolg entscheiden.

Eine Lagerhaltung durch die Unternehmen selbst wird von den Experten dieser Studie unterschiedlich bewertet. Eine staatliche Lagerhaltung wird nur für die Energierohstoffe Erdöl und Erdölprodukte durch den Erdölbevorratungsverband in Deutschland betrieben (EBV, 2021). Die Bundesregierung lässt im Zuge der Rohstoffstrategie als weitere Maßnahme (Nr. 7) in einer Auftragsstudie evaluieren, was für zusätzliche Möglichkeiten der Staat zur Rohstoffsicherung hätte (BMWi, 2019). Nachdem sich im Winter 2021/2022 die Gasspeicher in Deutschland auf dem niedrigsten Füllstand seit 15 Jahren befunden haben, hat die Bundesregierung im März 2022 einen Entwurf zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes zur Einführung von Füllstandsvorgaben für Gasspeicheranlagen vorgelegt (Deutscher Bundestag, 2022). Als Folge trat zum 1. Mai 2022 das „Gasspeichergesetz“ in Kraft, welches die Marktakteure verpflichtet, gewisse Füllstandsvorgaben einzuhalten (BMWK, 2022f).

Die Unternehmen sind sich ihrer Aufgabe bewusst, für ihre benötigten Rohstoffe zur Weiterverarbeitung zu sorgen. Sie verlassen sich dabei jedoch auf den Markt und adjustieren überwiegend in der Rohstoffwertschöpfungskette. Investitionen in Rohstoffhersteller werden zwar als geeignete Maßnahme genannt, jedoch nur von einem geringeren Anteil auch durchgeführt (Inverto, 2021a). Bei einem immer stärker umworbenen Markt sollten eine vertikale Integration in der Rohstoffwertschöpfungskette, unternehmerische Kompetenz bei Rohstoffgewinnung bzw. Rohstoffhandel und Anpassung des Rohstoffeinkaufs seitens der Unternehmen evaluiert werden. Insbesondere scheinen unterstützende Maßnahmen für den Mittelstand notwendig, um eine resiliente Rohstoffversorgung zu gewährleisten (Abel-Koch, 2021).

### **2.6.5 Herausforderungen bei der Rohstoffversorgung für Deutschland**

15 Experten aus der heimischen Exploration und Produktion sowie den Landesbergbehörden nehmen wahr, dass die Akzeptanz der Öffentlichkeit für den heimischen Rohstoffabbau, der dazu beitragen könnte, die Importabhängigkeit zu verringern, immer weiter nachlässt. In einer Studie für das Deutsche EnergieRohstoff-Zentrum vertraten 2014 noch 74 % von 1.001 befragten Deutschen die Meinung, Bergbau sei in Deutschland fortzuführen (Nippa, 2015). Weber et al. (2018) haben durch eine Medienanalyse ablehnende und befürwortende Argumente zum Rohstoffabbau in

Deutschland identifiziert und zeigen die konträren Argumente auf. Eine weitere Herausforderung sei, dass verschiedene Interessensparteien, Bürgerinitiativen, Politik, Behörden und Unternehmen auf ihren unterschiedlichen Positionen beharren. Auch in der Literatur wurden der fehlende „modus vivendi der Kommunikation“ und das Streben nach der Erreichung der eigenen Interessen bereits benannt (Kühne et al., 2020). An sechster Stelle wurde die Einflussnahme von Individuen und Bürgerinitiativen als weitere Herausforderung genannt. Auf Bürgerproteste reagiert die Politik beispielsweise durch Beteiligung der Bürger bei der Parlamentsarbeit, wie bei der Endlagerkommission (Deutscher Bundestag, 2017). Unternehmen stellen Arbeitsgruppen auf, die sich mit den Belangen der Bürger zu den einzelnen Projekten auseinandersetzen (K&S, 2014). Kühne et al. (2020) weisen darauf hin, dass eine Verschiebung der Diskussion von der Sachlage zu moralischen Verurteilungen der sich gegenüberstehenden Interessensvertretern eine der größten Herausforderungen der Gewinnung mineralischer Rohstoffe sei.

Der aus Expertenperspektive unzureichenden Aufklärung in der Bevölkerung (Herausforderung Informationsverteilung) zur Rohstoffexploration und -förderung, Bedarf und Verwendung von Rohstoffen soll beispielsweise durch die Maßnahme 6 der Rohstoffstrategie (2019) dadurch entgegengewirkt werden, dass die BGR damit beauftragt wird, „Rohstoffinformationen in allgemeinverständlicher Sprache aufzubereiten und Schulen sowie der allgemeinen Bevölkerung zur Verfügung zu stellen“ (BMWi, 2019). Weitere Initiativen wie beispielsweise RohstoffWissen e.V., ein Verein von Medien, Verbänden und Universitäten, zielen auf eine neutrale und sachliche Information und Diskussion zu Rohstoffen (<https://www.rohstoffwissen.org/>). Angebote wie beispielsweise der GeoKoffer des Industrieverbands Steine und Erden Baden-Württemberg (ISTE) bieten Lehrmaterial für Schulen an (ISTE, 2021). Auch auf europäischer Ebene wird für mehr Aufklärung im Bereich Rohstoffe beispielsweise durch das Programm RM@Schools der EIT Raw Materials geworben (EIT Raw Materials RM@Schools, 2021).

Durch die verstärkte Einbringung des Themas Rohstoffabbau und Rohstoffverwendung in Lehrpläne könnten die ersten Weichen für die Ausbildung der von den Experten genannten, dringend benötigten Fachkräfte gelegt werden.<sup>6</sup> Studien wie beispielsweise von PwC (2018, 2021) belegen den von Experten geäußerten Fachkräftemangel in der Industrie und bei den Behörden, der durch den demographischen Wandel einer alternden Bevölkerung zunehmen wird. Daten des Statistischen Bundesamtes zeigen, dass die Anzahl der deutschen Studienanfänger in den Fächern Bergbau und Metallurgie vom WS05/06 zum WS19/20 um ca. 30 % von 158 auf 111 Studierende und um ca. 75 % von 89 auf 22 Studierende zurückgegangen ist (DESTATIS, 2021f). In den Geowissenschaften ist die Zahl der Studienanfänger mit 1.312 (WS2020/21) seit mehr als zehn Jahren rückläufig (DESTATIS, 2021f).

Die Anzahl der Beschäftigten im heimischen Bergbau ist von 2005 bis 2020 um ca. 65 % von mehr als 70.000 auf weniger als 25.000 gesunken, davon sind allein 50 % auf die Beendigung des Steinkohlebergbaus zurückzuführen (DESTATIS, 2021g). Der Mangel an Fachkräften in Behörden und der Rückgang an Studienanfängern in den genannten Fächern sind daher womöglich auch Grund für die von fünf Experten genannte Herausforderung „Mangel an Fachwissen bei den Behörden“. Stellenpläne können teilweise aufgrund einer unattraktiven Besoldung nicht mit

---

<sup>6</sup> Als Fachkräfte werden sowohl Personen verstanden, die eine anerkannte akademische Ausbildung als auch eine anerkannte, mindestens zweijährige Berufsausbildung absolviert haben (Deutscher Bundestag, 2011; Obermeier, 2014).

praxiserfahrenen Mitarbeitern mit adäquatem Ausbildungs- und Erfahrungsstand besetzt werden. Mit der Fachkräftestrategie hat die Bundesregierung im November 2018 einen Plan vorgelegt, der dem Mangel durch Ausbildungsförderung oder dem Anwerben internationaler Fachkräfte entgegenwirken soll (Bundesregierung, 2018). In Verbindung zur Fachkräftestrategie wurde das Kompetenzzentrum Fachkräftesicherung vom BMWi damit beauftragt, kleine und mittlere Unternehmen dabei zu unterstützen, die benötigten Fachkräfte zu gewinnen. Ein Mangel an Fachkräften wird in der öffentlichen Verwaltung, der spanenden Metallverarbeitung und auch bei der Ver- und Entsorgung gesehen (Malin et al., 2019).

Den Herausforderungen „administrative Prozesslaufzeiten dauern zu lange“ und „komplexe Genehmigungsverfahren“ sollen mit einer durch das BMWi 2021 in Auftrag gegebenen Studie auf den Grund gegangen werden. In dieser Studie soll überprüft werden, ob Genehmigungsverfahren für Aufsuchung und Gewinnung in Deutschland länger dauern und in ihrer Anzahl weniger durchgeführt werden als in der Vergangenheit (EY, 2021). Hierdurch soll sich auch zahlenbasiert ableiten lassen, ob der bürokratische Aufwand, der als weitere Herausforderung von fünf Experten genannt wurde, bestätigen lässt. Benannt wird dieser auch in der Rohstoffklärung des BDIs von 2018 (BDI, 2018a). Durch das Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat wurde zuvor eine Studie zur Planungsbeschleunigung in Auftrag gegeben, welche aufzeigt, dass es auch im Interesse der Regierung ist, Prozesse, wie sie auch bei Regionalplanverfahren durchgeführt werden, so effizient und kurz wie möglich zu gestalten (Riedl et al., 2021).

Die meistgenannten Herausforderungen, die den Experten begegnen, sind disziplinübergreifend. Demnach stehen sich Experten aus unterschiedlichen Kategorien nicht nur mit unterschiedlichen Meinungen wie beispielsweise bei der Einbindung verschiedener Parteien in Genehmigungsverfahren gegenüber, sondern erleben bzw. nehmen auch die gleichen Herausforderungen wie Fachkräftemangel oder die Dringlichkeit einer resilienten Rohstoffstrategie wahr. Für mehr als die Hälfte der Experten entscheidet die Verfügbarkeit von Rohstoffen über die internationale Konkurrenzfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Deutschland. Lieferverzögerungen und Materialengpässe, die seit Beginn der COVID-19-Pandemie verstärkt auftreten, zeigen die nicht ausreichend resilienten Lieferketten Deutschlands im globalen Markt auf (Wohlrabe, 2021).

## 2.7 Schlussfolgerung

Die Rohstoffversorgung muss als eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe betrachtet werden, zu der alle Interessenvertreter beitragen müssen.

**Staat:** Um die Rohstoffimporte zu diversifizieren, müssen das ansässige und international anerkannte Fachwissen sowie der Innovationsgeist in Deutschland vom Staat weiter gefördert werden. Rohstoffrelevante Positionen im öffentlichen Dienst sollten entsprechend attraktiv angeboten werden, sodass das vorhandene Fachwissen nicht durch Lücken in der Besetzung beim Generationenwechsel verloren geht. Bestehende heimische Rohstoffprojekte müssen, unter nachhaltigen Gesichtspunkten, gefördert sowie potenzielle Rohstoffprojekte von Staat und Unternehmen gemeinsam evaluiert werden. Der Staat kann der Forderung nach mehr Unterstützung für die heimische Rohstoffförderung nachkommen und gleichzeitig die Position von Deutschland bei der Rohstoffversorgung im internationalen Vergleich strategisch neu ausrichten. Die Reduzierung der administrativen Prozesslaufzeit kann den ohnehin schon langwierigen Rohstoffprojektverläufen – der Zeitrahmen von der Exploration bis zur Produktion kann sich zwischen zehn und 15 Jahren bewegen – entgegenkommen.

**Verarbeitendes Gewerbe:** Bislang haben Unternehmen sich zumeist auf den Markt verlassen und überwiegend in der Rohstoffwertschöpfungskette adjustiert. Preisschwankungen wurden über den Finanzmarkt ausgeglichen – allerdings geht es nicht mehr nur noch um den Preis, sondern um die Verfügbarkeit. Bei einem stärker umworbene Markt müssen eine vertikale Integration in der Rohstoffwertschöpfungskette, unternehmerische Kompetenz bei Rohstoffgewinnung bzw. -handel und eine Anpassung des Rohstoffeinkaufs seitens der Unternehmen evaluiert werden. Unternehmen können noch von dem in Deutschland vorhandenen Rohstofffachwissen profitieren. Eine rasche Umsetzung darf die Erreichung der Klimaschutzziele nicht außer Acht lassen und stattdessen sollte durch neue Technologien die Rohstoffversorgung nachhaltig und auf dem höchsten Stand der Technik gestaltet werden. Dies ist eine Chance für die deutsche Industrie, sich in diesem Bereich weltweit zu positionieren und führende Technologien zu entwickeln.

**Institutionen:** Die Aufklärungsarbeit, die bereits vom Bund und unterschiedlichen Initiativen geleistet wird, gilt es auszubauen und schon im schulischen System Rohstoffe aus der Lagerstätte und dem Recycling in ihrer gesamten Vielfalt darzustellen. Dies ist unerlässlich für die Ausbildung von qualifizierten Fachkräften mit einem holistischen Verständnis, welche das vorhandene Fachwissen in den Arbeitsmarkt einbringen und zukunftsweisend einsetzen können.

**Bevölkerung:** Erfolgreiche Rohstoffprojekte innerhalb Deutschlands und Europas werden nicht durchzuführen sein, wenn die Ablehnung durch die Öffentlichkeit Rohstoffprojekte ver- bzw. behindert. Es ist essenziell, dass die ökologischen, ökonomischen und sozialen Konsequenzen des Realisierens oder des Ablehnens einer heimischen Rohstoffförderung von der Bevölkerung verstanden und dann auch getragen werden.

## 3. Lithiumbedarf für die Batteriezellenfertigung in Deutschland und Europa im Jahr 2030

### 3.1 Zusammenfassung

Um in der EU die Mobilität, wie im Paket „Fit for 55“ der EU festgelegt, emissionsfrei zu gestalten, werden Technologien für die Elektromobilität (E-Mobilität) ausgebaut. Der führende Energiespeicher hierfür ist bis auf Weiteres die Lithium-Ionen-Batterie (LIB). In den kommenden Jahren sollen in Deutschland und anderen europäischen Ländern Produktionsstätten für LIBs errichtet werden. In Deutschland sind aktuell mindestens zehn Batteriezellenproduktionsstandorte geplant (Stand Frühjahr 2022). Die Elektrodenmetalle (Li, Ni, Co, Mn, Al) stehen gegenwärtig nur durch Importe zur Verfügung. Die Gewinnung von Lithium (Li) aus Lagerstätten der EU-27 wird in verschiedenen Projekten angestrebt. Stand Mai 2022 existieren sieben Projekte in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium, die eine industrielle Förderung von Lithium aus konventionellen, magmatischen oder sedimentären Lagerstätten sowie aus unkonventionellen Lagerstätten, geothermalen Solen, je nach Projekt ab 2024, 2025 oder 2026 vorsehen. Nach Angaben der Produzenten könnten im Jahr 2030 Lithiumchemikalien wie Lithiumhydroxid Monohydrat, Lithiumkarbonat sowie Lithiumfluorid, die für die Produktion von Elektroden notwendig sind, in Höhe von 133,6 kt Lithiumäquivalent (LCE) jährlich durch diese heimischen Lagerstätten bereitgestellt werden. Recycling könnte nach DERA-Prognosen zwischen 2,5 % und 10,6 % des Bedarfs an Lithium im Jahr 2030 in Europa decken.

In der vorliegenden Studie wird berechnet, dass die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 zwischen 60,4 kt LCE und 173,2 kt LCE jährlich benötigen wird. Mittels verschiedener Annahmen wird eine Verfügbarkeit dafür von Primärlithium aus den sieben EU-27 Projekten mit maximal ca. 39,4 kt LCE/a und von Sekundärlithium mit maximal ca. 6,9 kt LCE/a berechnet. Je nach Szenario bleiben zwischen 47,5 kt LCE/a und 173,2 kt LCE/a, die im Jahr 2030 über Lieferketten aus dem außereuropäischen Ausland zu decken sind, was je nach Preisannahme ein monetäres Volumen zwischen 1,2 und 11,5 Mrd. US\$ darstellt. Bei Einbeziehung von bereits bestehenden Abnahmeverträgen der Lithiumprojekte in der EU-27 und der Annahme einer Reduktion im Lithiumverbrauch in den Kathoden sowie von Effizienzsteigerungen im Recycling kann die Eigenversorgung an Lithium für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 mit dem für Deutschland am Markt verfügbarem europäischem Primär- und Sekundärlithium prozentual betrachtet maximal zu 34,5 % (Szenario PFS3/I9; 15 kt LCE) bzw. absolut betrachtet maximal zu 31 kt LCE (Szenario PFS3/I27; 22 %) erfolgen.

Folglich bleibt die geplante Batteriezellenproduktion in Deutschland, der EU-27 und weiteren Staaten in Europa auch zukünftig von der Rohstoffgewinnung im Ausland und resilienten Lieferketten abhängig. Die Weiterentwicklung und der Ausbau der Recyclingmöglichkeiten innerhalb Europas sind essenziell für die Deckung der wachsenden Nachfrage. Allerdings wird es keine autarke Produktion von Lithium-Ionen-Batteriezellen im Jahr 2030 in Europa geben, da neben den unzureichenden Mengen an Primär- und Sekundärlithium weder eine ausreichende Infrastruktur

für die Raffination der benötigten Lithiummengen noch für die Elektrodenproduktion in Aussicht sind. Wenn Europa nicht an alle Prozessschritte der Wertschöpfungskette investiert, wird es weiterhin von asiatischen, insbesondere von chinesischen Produzenten abhängig bleiben.

## 3.2 Einführung

Lithium (Li) ist das leichteste Metall des Periodensystems. Es kommt mit 0,007 % in der Erdkruste vor und ist durch seine steigende Relevanz als Rohstoff für Zukunftstechnologien seit 2020 ein potenziell kritischer Rohstoff für die EU (EU-Kommission, 2020a). Lithium wird derzeit zu ca. 56 % aus Festgesteinen und zu ca. 31 % aus Solen gewonnen, weitere 13 % sind beiden Lagerstättentypen zuzuordnen (vgl. USGS, 2022; Schmidt, 2017).

Die Lithium-Ionen-Batterie (LIB) hat im Vergleich zu anderen Batterietechnologien eine hohe gravimetrische Energiedichte, je nach Zellformat liegt diese zwischen 150 und 300 Wh/kg, die einer Natrium-Ionen-Batterie liegt bei ca. 50–120 Wh/kg (Michaelis et al., 2020; Fatima et al., 2021). Deshalb und aufgrund ihrer Lebensdauer und der hohen Marktreife werden LIBs als Energiespeicher in der Elektromobilität (E-Mobilität) genutzt (Tarascon, 2010; Hund et al., 2020; Duffner et al., 2021). Die Anwendung von Lithium in wieder aufladbaren Batterien für portable Elektronik, für Elektrofahrzeuge und auch Elektrowerkzeuge hat dazu geführt, dass sich der Prozentsatz von Lithium für Batterieanwendungen an der globalen Produktion innerhalb von zehn Jahren von 27 % in 2011, bei einer globalen Produktion von 34 kt Lithium, auf 74 % in 2021, bei einer globalen Produktion von 104,8 kt Lithium, erhöht hat, mit steigender Tendenz (USGS, 2012, 2022; Schmidt, 2022). Die Keramik- und Glasindustrie ist mit 14 % weiterhin der zweitgrößte Abnehmer für Lithium (USGS, 2022). Anwendung findet Lithium darüber hinaus auch in der Aufbereitungstechnik von Luft, in chemischen Anlagen und Atomkraftwerken, in der Polymerindustrie, als Fluss- und Schmiermittel sowie in der psychomedizinischen Pharmazie (BGR, 2020a).

Im Juni 2022 hat das EU-Parlament dem Vorschlag der Europäischen Kommission vom Juli 2021 zugestimmt, im Rahmen des europäischen Grünen Deals ab 2035 die CO<sub>2</sub>-Emissionen für Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge um 100 % zu senken (EU-Parlament, 2022). Dies hat zur Folge, dass Neufahrzeuge mit Verbrennungsmotor ab 2035 in der EU nicht mehr verkauft werden dürften (EU-Kommission, 2021; Rat der EU, 2022). Der weltweit vermehrte Einsatz von Elektrofahrzeugen mit Batterie (BEV) wird den Lithiumbedarf weiter steigern.

Im Rahmen dieser Studie wird mit einer Szenarioanalyse die Höhe eines möglichen europäischen Primär- und Sekundärlithiumangebots und der Lithiumbedarf (in t LCE) für die Kathoden in der Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 ermittelt. Hierfür werden Recherchen ausgewertet und eine Nachfrage-Angebotsgleichung aufgestellt. Mittels einer Sensitivitätsanalyse wird die Auswirkung einzelner Komponenten auf das Ergebnis überprüft. Abschließend werden die Ergebnisse der Szenarioanalyse diskutiert.

## 3.3 Ausgangslage

### 3.3.1 Zukünftiger Lithiumbedarf

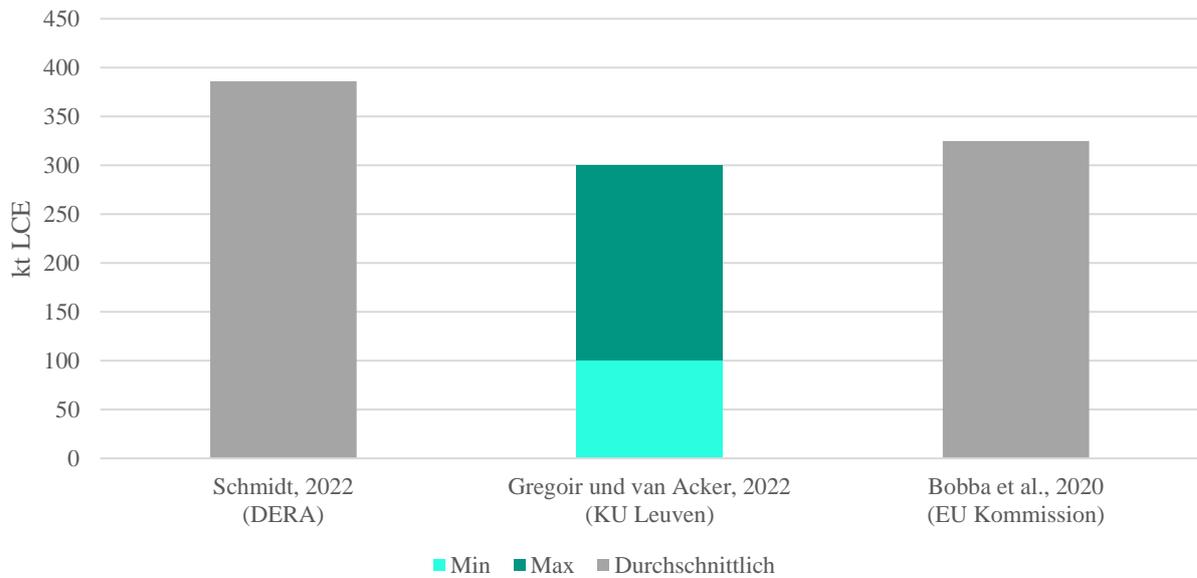
Dass die Verfügbarkeit von Lithium für die kontinuierlich wachsende Nachfrage nach LIBs in der E-Mobilität zukünftig herausfordernd sein könnte, wird seit mehreren Jahren von unterschiedlichen Autoren prognostiziert (vgl. Väyrynen und Salminen, 2012; Kushnir und Sandén, 2012; Vikstroem, 2013; Speirs et al., 2014; Olivetti et al., 2017). Bei Einhaltung einer Klimaerwärmung von maximal 2 °C im Jahr 2100 (2 °C-Szenario, IEA) sieht die Weltbank den weltweiten Bedarf an Lithium für Energiespeicher für das Jahr 2050 bei ca. 415 kt, was die Lithiumproduktion aus dem Jahr 2021 (ca. 100 kt) um das Vierfache übersteigen würde (IEA, 2017; Hund et al., 2020; Anmerkung: Aktualisierung der Lithiumproduktion 2018: ca. 95 kt, USGS, 2022).

Für das Jahr 2040 wird ein globaler Bedarfszuwachs an Lithium für Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher für mobile Anwendungen um das Zehn- bis Fünzigfache im Vergleich zu 2018 erwartet (Marscheider-Weidemann et al., 2021). Hinzu kommt der Bedarf an Lithium für Feststoffbatterien, welcher dazu beiträgt, dass die Lithiumnachfrage weltweit für beide Energiespeichertechnologien, je nach Szenario, im Jahr 2040 bei 77,6 kt (413 kt LCE), 375,1 kt (1.997 kt LCE) oder 554,3 kt (2.950 kt LCE) liegen könnte (Marscheider-Weidemann et al., 2021). Diese Szenarien basieren auf den möglichen Zukunftsszenarien, den „Shared Socioeconomic Pathways“ (SSP) des Weltklimarats (IPCC) (O’Neill et al., 2017). In der am 23.06.2022 vorgestellten Aktualisierung ihrer Risikobewertung Lithium gibt die DERA die globale Nachfrage nach Lithium für Batterieanwendungen bereits für das Jahr 2030 im SSP2 mit ca. 281 kt an (Schmidt, 2022). Des Weiteren zeigt sie verschiedene Szenarien auf, in denen es im Jahr 2030 zu einem Angebotsdefizit von Lithium zwischen 69 kt (367 kt LCE) und 341 kt (1.671 kt LCE) auf dem Weltmarkt kommen kann (Schmidt, 2022).

Für die E-Mobilität in Europa<sup>7</sup> wird von einem Lithiumbedarf von ca. 72,5 kt (386 kt LCE) ausgegangen (Schmidt, 2022). Eine weitere Studie (Gregoir und van Acker, 2022), welche auf Szenarien aufgestellt von der IEA beruht, berechnete die Lithiumnachfrage für Batteriespeicher und elektrische Fahrzeuge für Europa<sup>8</sup> für 2030 mit 100 kt LCE bis 300 kt LCE und für 2050 mit 600 kt LCE bis 800 kt LCE, abhängig vom Erfolg der Implementierung von neuen Produktionsstandorten für Batteriezellen (Gregoir und van Acker, 2022). 2020 nahm die Europäische Kommission für 2030 eine Lithiumnachfrage für Batterien für die E-Mobilität und Erneuerbare Energien in der EU-27 von ca. 61 kt (ca. 325 kt LCE) an (Abb. 3.1; Bobba et al., 2020).

<sup>7</sup> Der Begriff „Europa“ wird in der Aktualisierung der Risikobewertung von Lithium der DERA (Schmidt, 2022) nicht näher definiert.

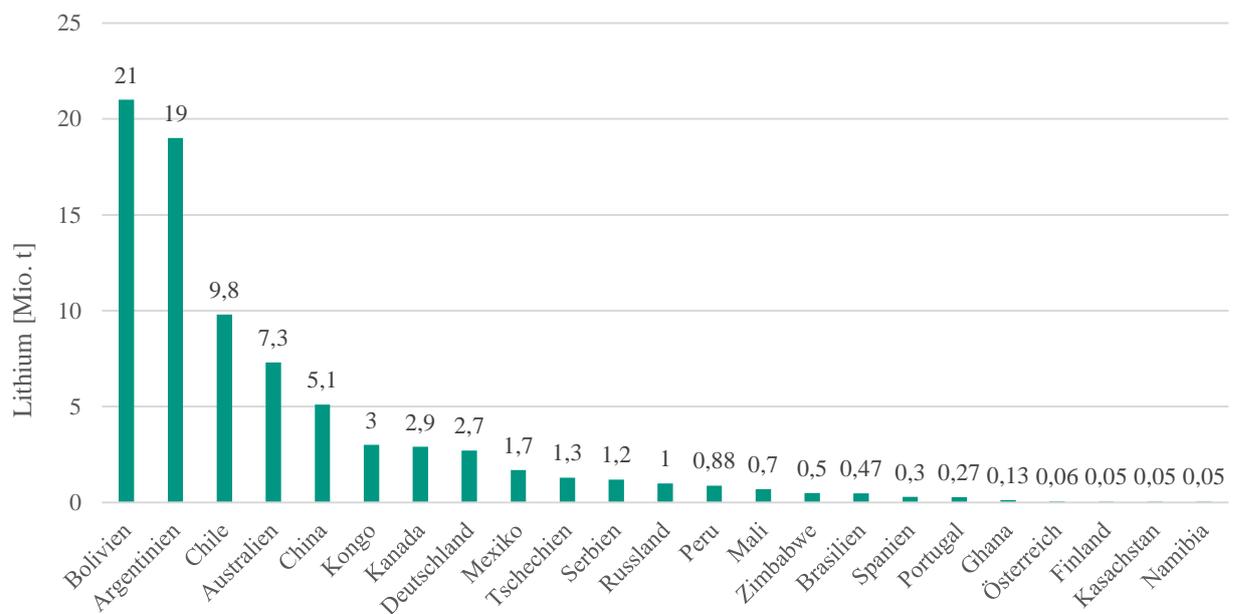
<sup>8</sup> In der Studie von van Gregoir & Acker beinhaltet der Begriff Europa die 27 Mitgliedstaaten der Europäischen Union, das Vereinigte Königreich und die EFTA-Mitgliedstaaten (Island, Liechtenstein, Norwegen und die Schweiz) (Gregoir & van Acker, 2022).



**Abbildung 3.1:** Lithiumnachfrage für die E-Mobilität im Jahr 2030 in der EU-27 und weiteren europäischen Ländern (nach Schmidt, 2022; Gregoir und van Acker, 2022; Bobba et al., 2020).

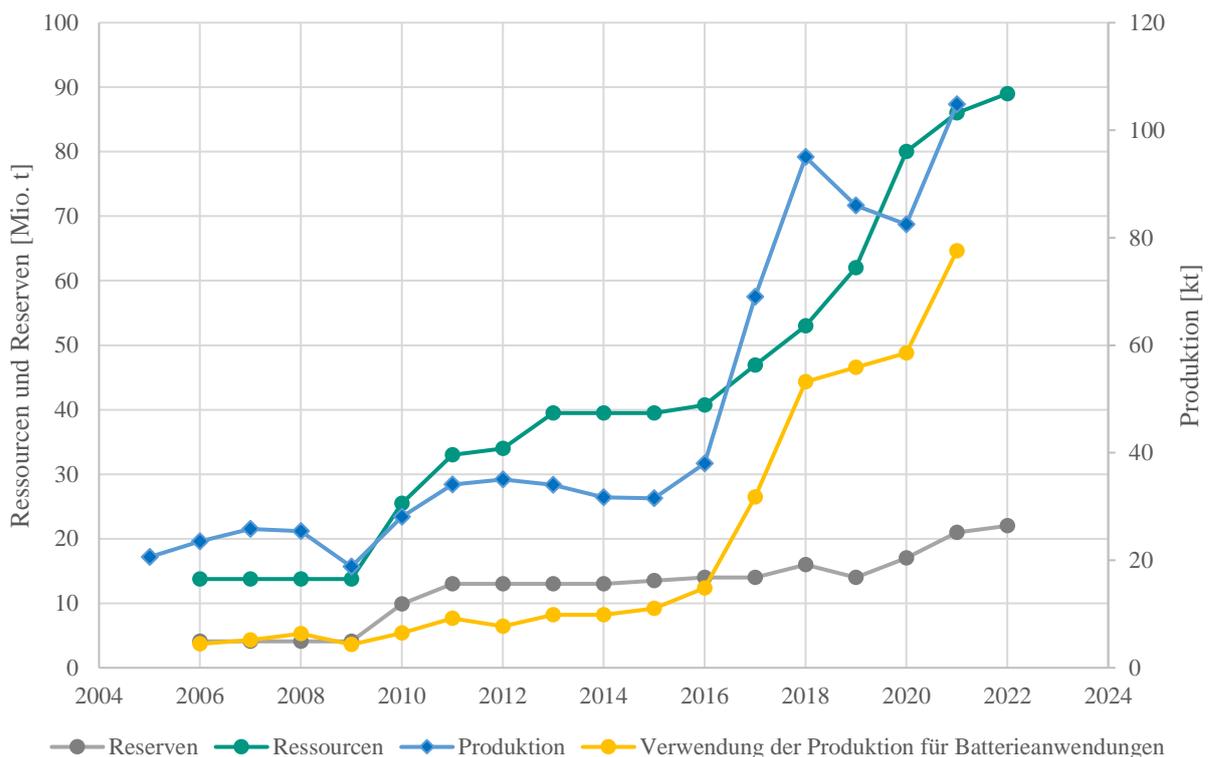
### 3.3.2 Lithium-Ressourcen und -Produktion

Die Nachfrage nach Lithium wird global durch Primärrohstoffe gedeckt, die größten Lithiumreserven und -ressourcen liegen in Lateinamerika und Australien (USGS, 2022). Raffiniertes Lithium stammt zu Teilen ebenfalls dort her, hauptsächlich aber aus China (Schmidt, 2022). 2021 beliefen sich die weltweiten identifizierten Lithiumressourcen auf 89 Mio. t Lithium, die Reserven auf 22 Mio. t Lithium (Abb. 3.2; USGS, 2022).



**Abbildung 3.2:** Verteilung der identifizierten Lithiumressourcen weltweit in Millionen Tonnen (Stand 2021; USGS, 2022).

Durch den Ausbau der Exploration steigen die Lithiumreserven und -ressourcen jährlich (Abb. 3.3; USGS, 2006–2022). Die globale Produktion von Lithium ist in den vergangenen zwei Jahrzehnten mit Unterbrechungen von Angebotsüberhängen, der Weltwirtschaftskrise 2008/2009 und dem Ausbruch der COVID-19-Pandemie von 14,2 kt im Jahr 2002 auf 82,5 kt Lithium im Jahr 2020 gestiegen. Für das Jahr 2021 werden 104,8 kt erwartet, was eine Steigerung um ca. 27 % innerhalb eines Jahres wäre (USGS, 2001–2022). Der Anteil der Produktion, der für Batterieanwendungen weltweit verwendet wird, stieg von 4,5 kt Lithium im Jahr 2006 auf 77,6 kt Lithium im Jahr 2021, seit 2015 ist die Verwendung in Batterietechnologien die Hauptanwendung von Lithium (Abb. 3.3; USGS, 2007–2022).



**Abbildung 3.3:** Entwicklung weltweiter Lithiumproduktion und Verwendung in Batterietechnologien (in kt Lithium) sowie die Entwicklung der explorierten Lithiumreserven und -ressourcen (in Mio. t Lithium) (nach USGS, 2002–2022).

Für Bergbauprojekte werden je nach Projektstadium unterschiedlich detaillierte, standardisierte Bewertungen erstellt, in denen u. a. die zukünftigen Rohstoffproduktionsmengen gestützt auf den ermittelten Ressourcen und Reserven angegeben werden, um eine Einschätzung für die Rentabilität und finanzielle Machbarkeit eines Bergbauvorhabens zu liefern (Bullock, 2011). Bei Ressourcen handelt es sich um gegenwärtig bekannte, jedoch nicht ökonomisch abbaubare Vorkommen (JORC, 2012). Gemäß USGS (2022) werden Ressourcen in identifizierte und unentdeckte Ressourcen unterteilt. Die identifizierten Ressourcen werden nochmals in gemessene (measured), angezeigte (indicated) und vermutete (inferred) Ressourcen unterteilt. Bei gemessenen Ressourcen handelt es sich um Ressourcen, bei denen die geologische Beschaffenheit (u. a. Größe, Form, Tiefe, Mineralgehalt) durch Messungen und detaillierte Probenahmen mit ausreichender Sicherheit geschätzt werden kann. Bei angezeigten Ressourcen kann die geologische Beschaffenheit ebenfalls ausreichend bestimmt werden, jedoch mit einer niedrigeren Sicherheit aufgrund einer geringeren Datendichte. Vermutete Ressourcen werden aufgrund einer gefolgerten Kontinuität der gemessenen

und/oder angezeigten Ressourcen angenommen (USGS, 2022). Bei Reserven handelt es sich um bekannte und technisch wie auch wirtschaftlich abbaubare Lagerstätten (Hilgers et al., 2021). Unentdeckte Ressourcen werden vom USGS (2022) in hypothetische und spekulative Ressourcen unterteilt, es sind jene Ressourcen, bei denen aufgrund der geologischen Gegebenheiten erwartet werden kann, dass sie durch moderne Explorationsmethoden entdeckt werden könnten, sie entsprechen dem Begriff des Geopotentials (USGS, 2022; Wellmer, 2008).

Bei einem klassischen Drei-Phasen-Ansatz (Lee, 1984) wird zunächst eine Scoping-Study (Konzeptstudie) durchgeführt, darauf folgt eine Vormachbarkeitsstudie (Pre-Feasibility Study, PFS) und abschließend wird das Projekt mit einer Machbarkeitsstudie (Feasibility Study, FS) bewertet. Eine Konzeptstudie stellt die relevantesten Fakten eines möglichen Bergbauvorhabens dar und bestimmt damit die Entscheidung für oder gegen Investitionen in weiterführende Studien sowie deren Inhalt (Mackenzie und Cusworth, 2007). Nach dem Kanadischen Institut für Bergbau, Metallurgie und Petroleum (CIM, 2014) zufolge stellt eine Vormachbarkeitsstudie (PFS) eine detaillierte Analyse der technischen und wirtschaftlichen Gegebenheiten eines Bergbauvorhabens dar. Die Machbarkeitsstudie (FS) konkretisiert die Bestandteile der PFS, sie liefert umfangreichere Angaben über die geologischen, technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gegebenheiten des Bergbauvorhabens. Hierdurch können die Effektivität und Profitabilität des Projekts und damit mögliche Investitionen bewertet werden (CIM, 2014). Das NASA-Konzept des technologischen Reifegrads (Technology Readiness Level, TRL) kann während aller Studien herangezogen und auch im Bergbau als Projektmanagementmethode angewandt werden (DUSD(S&T), 2003).

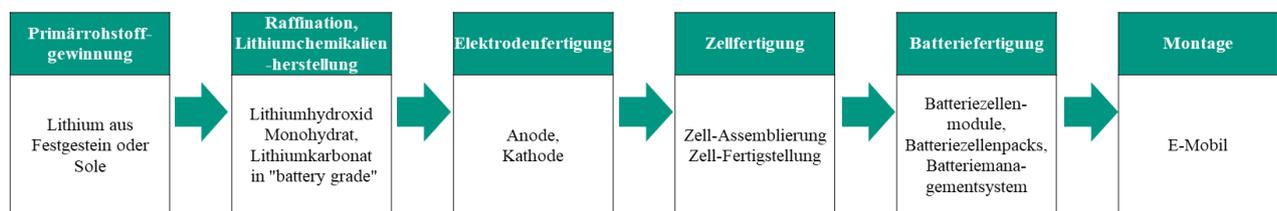
In Deutschland wird noch kein Primärlithium im industriellen Maßstab gefördert (BGR, 2021; BGR, 2020a). In Europa wird bislang nur in Portugal Lithium gefördert, die Produktion lag im Jahr 2021 bei 900 t (USGS, 2022). Bislang existiert keine Lithiumraffination in den Ländern der EU-27 (Hilgers und Becker, 2020). Für das Jahr 2030 wird in Europa eine Raffineriekapazität von 155 kt LCE (battery grade) prognostiziert, zusätzlich geplant sind weitere 130 kt LCE verteilt auf Deutschland, Polen und das Vereinte Königreich, die jedoch noch in frühen Projektstadien seien (Gregoir und van Acker, 2022). In Deutschland sollen Lithiumraffinerien an drei Standorten entstehen (Stand Juli 2022; AMG Lithium, 2022; Rock Tech Lithium, 2022; VER, 2022b).

Neben der heimischen Förderung beruht die Rohstoffbeschaffungsstrategie Deutschlands auf Importen und dem Recycling (BMW, 2019); die Rohstoffstrategie des Bundes wird derzeit überarbeitet. Das Recycling von Lithium spielt bislang eine untergeordnete Rolle, die EOL-RIR (End-of-Life Recycling Input Rate) von Lithium in der EU betrug 2017 noch 0 % (EU-Kommission, 2018). Die EOL-RR (End-of-Life Recycling Rate) liegt bei weniger als 1 % (Di Persio et al., 2020; IEA, 2021a). Die Sammelquote (CR = collection rate, auch scarp collection rate – Altschrottsammelquote) gibt die Menge eines Metalls an, die in End-of-Life-Produkten (EOL) enthalten ist, die gesammelt und den Recyclingwegen zugeführt werden (Weil und Ziemann, 2014). Die End-of-Life Recycling Rate (EOL-RR) gibt den Prozentsatz eines Materials in den Abfallströmen an, der tatsächlich recycelt wird (Output-Perspektive) (Di Persio et al., 2020). Die End-of-Life Recycling Input Rate (EOL-RIR) gibt an, wie viel des gesamten Materialinputs in das Produktionssystem aus dem Recycling von Post-Verbraucher-Schrott stammt (Input-Perspektive) (Di Persio et al., 2020).

Es wird angenommen, dass mit steigenden Rückführquoten der LIBs die Verfügbarkeit von recyceltem Lithium zunehmen und entsprechend die Einsatzquote in neuen LIBs in den kommenden Jahrzehnten, nach 2030, ansteigen wird, sofern die technische Machbarkeit im industriellen Maßstab gegeben ist (Gregoir und van Acker, 2022; Mayya et al., 2018; Velázquez-Martínez et al., 2019). Dies muss geschehen, damit die von der Europäischen Kommission für das Jahr 2030 vorgeschlagenen Quotenvorgaben für die Recyclingeffizienzen und den Recyclinganteil in LIBs in Höhe von 35–70 % (je nach bevorzugter Option) erfüllt werden können (EU-Kommission, 2020).

### 3.3.3 Wertschöpfungskette Lithium-Ionen-Batterie (LIB)

Bei der Fertigung einer LIB wird das Lithiumerz für die Herstellung der positiven Elektrode (beim Entladen: Kathode) als Lithiumhydroxid Monohydrat ( $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ ; battery grade verfügbar ab min. 56,5 wt% LiOH; Livent, 2018) oder als Lithiumkarbonat ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ; battery grade min. 99,95 wt% LiOH; Livent, 2022) raffiniert (Abb. 3.4). Neben Lithium sind für die Herstellung der Elektroden in einer LIB Graphit (beim Entladen: Anode) sowie die Metalle Aluminium, Kobalt, Mangan und Nickel (beim Entladen: Kathode) essenziell (DERA, 2021b). Außerdem wird in der Kollektorfolie der Anode Kupfer benötigt (DERA, 2021b). Nachdem die Elektrodenfertigung abgeschlossen ist, wird die Batteriezelle<sup>9</sup> gefertigt (Heimes et al., 2018). Anschließend werden erst die Batteriemodule<sup>10</sup> und dann die Packs<sup>11</sup> entsprechend dem Kundenbedarf zu einer Batterie für die Fahrzeugmontage zusammengesetzt (Heimes et al., 2018a). Batterien für Verkehrsfahrzeuge können zwischen 7.000 und 10.000 Batteriezellen benötigen (Type 18650; Karabelli und Oberle, 2022). Der Energiespeicher für das Tesla Model Y besteht aus 4.416 Zellen (Brigde und Faigen, 2022).



**Abbildung 3.4:** Vereinfachte Darstellung der Wertschöpfungskette einer LIB für die E-Mobilität (nach Väyrynen und Salminen, 2012; Heimers et al., 2018, 2018a; Karabelli und Oberle, 2022).

Die globale Nachfrage nach großformatigen Batterien für das Jahr 2030 wurde von der Unternehmensberatung Roland Berger im Jahr 2019 mit 2 TWh prognostiziert (Bernhart, 2019). Einer neueren Studie zufolge soll die Nachfrage nach LIBs für das Jahr 2030 weltweit ca. 3.127 TWh betragen (Roland Berger, 2022). Das Fraunhofer ISI gibt eine Nachfrage in Europa für das Jahr 2030 mit 1 TWh an (Thielmann et al., 2020). Im Jahr 2020 betrug die Auftragslage für Batteriezellen und Batterien 747 GWh weltweit, davon wurden 76 % (568 GWh) in China gefertigt, Europa lag mit 7 % (52 GWh) zwar hinter den USA mit 8 % (60 GWh), aber bereits vor Südkorea

<sup>9</sup> Eine Batteriezelle besteht aus den Komponenten: Anode, Kathode und einem Separator (Heimes et al., 2018).

<sup>10</sup> Batteriemodule bestehen aus mehreren parallel oder seriell verschalteten Batteriezellen, Sensoren, dem Batteriemanagementsystemmodul und dem Kontaktierungssystem in einem Gehäuse mit Isolationsplatte und -folie (Heimes et al., 2018a).

<sup>11</sup> Batteriepacks sind mehrere Batteriemodule, die mit anderen elektrischen, mechanischen und thermischen Komponenten zusammengebaut sind (Heimes et al., 2018a).

mit 5 % (37 GWh) und Japan mit 4 % (30 GWh) (Bridge und Faigen, 2022). Ende 2021 gab es global 150 „Gigafactories“ mit einer Energiespeicherproduktionskapazität von ca. 1 TWh (Bridge und Faigen, 2022). Die größten Produzenten in den letzten Jahren waren LG Chemical (17 %; Hauptsitz in Seoul, Südkorea; Produktionsstätten in Südkorea, China, USA und Polen), Samsung (13 %; Hauptsitz in Yongin, Südkorea; Produktionsstätten in Asien, USA und Europa), Panasonic (12 %; Hauptsitz in Kadoma, Japan; Produktionsstätten in Japan, China und USA) und CATL (11 %; Hauptsitz in Ningde, China; Produktionsstätten in China und Deutschland) (Karabelli und Oberle, 2022; Bridge und Faigen, 2022). Die Elektrodenproduktion findet ebenfalls hauptsächlich in Asien statt. China, Japan und Südkorea produzieren gemeinsam ca. 97 % der Kathoden und 99 % der Anoden (IEA, 2022). Hauptproduzenten sind CNGR (Hauptsitz: China), BASF (Hauptsitz: Deutschland), Johnson Matthey (Hauptsitz: England), Umicore (Hauptsitz: Belgien), und Sumitomo (Hauptsitz: Japan) (Bridge und Faigen, 2022). Für 2025 ist eine europäische Kathodenproduktion von 4 % und eine Anodenproduktion von 2 % geplant (IEA, 2022). Die Produktion von Elektroden kann integriert in einer „Giga-Factory“ oder separat erfolgen (Bridge und Faigen, 2022).

### 3.4 Methodik

Um ein hypothetisches Spektrum des Lithiumbedarfs und die Möglichkeiten der Deckung einer entsprechenden Lithiumnachfrage im Jahr 2030 für die Batteriezellenproduktion in Deutschland aufzeigen zu können, wird das Vorgehen einer Szenarioanalyse gewählt. Szenarioanalysen werden im Bereich des strategischen Managements angewandt und können daher in verschiedensten Disziplinen mit betriebswirtschaftlichem Bezug übertragen werden, so auch bei der Aufstellung von Nachfrageszenarien für Rohstoffe und Energie (Brauers und Weber, 1988; vgl. IEA, 2021a, 2021b). Eine Szenarioanalyse kann auch dann herangezogen werden, wenn für eine zukünftige Situation keine analogen historischen Daten zur Verfügung stehen und mehrere Einflussfaktoren existieren, welche bewusst miteinbezogen oder ausgeschlossen werden (Kosow und Gaßner, 2008). Als Grundlage der Szenarioanalyse wird eine Nachfrage-Angebotsgleichung (1) angenommen, in welcher die Nachfrage dem Bedarf (2) gleichkommt:

$$N(Li) = A(Li) \quad (1)$$

$$N(Li) = B(Li) \quad (2)$$

*B = Bedarf, N = Nachfrage, A = Angebot, Li = Lithium*

Um Szenarien zur Lösung der Nachfrage-Angebotsgleichung aufstellen zu können, werden folgende Inputparameter mittels einer Onlinerecherche erfasst:

- der geplante Ausbau der Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa,
- der Lithiumbedarf in verschiedenen Batteriezellentechnologien nach Marktanteil,
- die Lithiumproduktion der geplanten Lithiumförderprojekte in Europa und
- der Stand des Lithiumrecyclings in Europa.

Die Daten der Recherchen ermöglichen es, Szenarien für die Batteriezellenproduktionskapazitäten ( $S_n$ ) in GWh in Deutschland für das Jahr 2030 zu definieren (Kap. 3.5.1). Diese stellen die Ausgangslage für die Berechnung des Lithiumbedarfs ( $B(Li)_{S_n}$ ) für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und in Europa im Jahr 2030 dar (3) (Kap. 3.5.2). Die Angebotsseite ( $A(Li)_{S_n}$ ) wird durch drei Komponenten definiert (Kap. 3.5.3). Als erste Angebotskomponente dient das europäische Primärlithium ( $P_{bn}$ ), das aus konventionellen, magmatischen und sedimentären Gesteinen sowie unkonventionellen geothermalen Solen gewonnen werden soll. Als zweite Angebotskomponente wird das potenzielle Angebot an Sekundärlithium in Europa definiert, das sich durch das Produkt der zu erwartenden Recyclingquote und dem Bedarf ( $R_x * B(Li)_{S_n}$ ) ergibt. Die dritte Angebotskomponente stellen die Mengen dar, die auf dem außereuropäischen Markt nachgefragt werden müssten ( $I_m$ ), diese werden durch Umstellen der Gleichung (5) ermittelt:

$$B(Li)_{S_n} = A(Li)_{S_n} \quad (3)$$

$$B(Li)_{S_n} = P_{bn} + (R_x * B(Li)_{S_n}) + I_m \quad (4)$$

$$I_m = B(Li)_{S_n} - P_{bn} - (R_x * B(Li)_{S_n}) \quad (5)$$

$S$ = Batteriezellenproduktion	$n$ = Kapazitätsszenario
$P$ = Europäisches Primärlithium	$b$ = Primärlithiumangebotszenario
$R$ = Europäische Sekundärlithiumrate	$x$ = Recyclingrateszenario
$I$ = Nachfragemenge außereuropäischer Markt	$m$ = Außereuropäisches Nachfrageszenario

Die Lithiumbedarfsdeckung für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 wird für einen Grundfall und mittels Einbeziehung von bereits geschlossenen Lithium-Abnahmeverträgen für einen Praxisfall berechnet. Außerdem wird der Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030 kalkuliert (Kap. 3.5.4). Eine monetäre Größenordnung möglicher Nachfragemengen von Lithiumchemikalien auf dem außereuropäischen Markt wird durch drei Preisszenarien für Deutschland und Europa determiniert. In der vorliegenden Studie wird Europa als Überbegriff für die Staaten der EU-27 sowie Norwegen, Serbien und das Vereinigte Königreich verwendet. Wie der Lithiumbedarf sich verhält, wenn durch Weiterentwicklung der Kathoden- und Batterietechnologien der Lithiumverbrauch verringert wird und durch steigende Recyclingraten der Anteil an Sekundärlithium erhöht wird, wird in einer Sensitivitätsanalyse betrachtet. Grundsätzlich werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Auswirkungen einer Veränderung der unterschiedlichen Parameter einer Gleichung zu identifizieren und zu beurteilen (vgl. Vanuytrecht et al., 2014; Iooss und Saltelli, 2017).

Wie viel Lithium in einer Batterie zelle verbaut wird, hängt von der Kathodentechnologie und dem Zelldesign ab (Marscheider-Weidemann et al., 2021). Die Menge von Lithium in der positiven Elektrode ist durch die Entwicklung der Batteriezellentechnologie in den vergangenen Jahren gesunken (vgl. Tarascon, 2010a; Simon et al., 2015; Olivetti et al., 2017). Im Jahr 2010 lag der Lithiumeinsatz noch bei ca. 150 g/kWh Batteriekapazität, in der Studie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ der DERA wurden Werte zwischen 80 und 123 g/kWh je nach Kathodentechnologie angegeben (Tarascon, 2010; Marscheider-Weidemann et al., 2021). Der Lithiumanteil variiert je Kathodentyp. Die Zahlenangaben im Kürzel der Kathodentechnologie geben das Verhältnis der anderen Metallbestandteile an, so beispielsweise (Thielmann et al., 2015):



Unter Primärlithium wird in dieser Studie Lithium verstanden, welches aus Festgestein (Granit, Pegmatit und Sediment) im Tage- oder Untertagebergbau, oder aus Geothermalwasser, welches bei der Tiefengeothermie gefördert wird, gewonnen wird und noch nicht Bestandteil eines industriellen Rohstoffkreislaufes gewesen ist (vgl. Meshram et al., 2014). Lithium in magmatischen Gesteinen ist an Minerale wie beispielsweise Zinnwaldit (Glimmermineral) oder Spodumen gebunden, in sedimentären Gesteinen an Minerale wie Jadarit oder Zeolith (Breiter et al., 2019; Barros et al., 2016; Grant und Goodenough, 2021). Nach dem Abbau kann durch diverse Aufbereitungsschritte und metallurgische Behandlungen Lithium in Form von Lithiumoxid ( $\text{Li}_2\text{O}$ ), Lithiumchlorid ( $\text{LiCl}$ ), Lithiumkarbonat ( $\text{LiCO}_3$ ), Lithiumhydroxid Monohydrat ( $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) oder Lithiumfluorid ( $\text{LiF}$ ) gewonnen werden (Peerawattuk und Bobicki, 2018; Swain, 2017). Die unterschiedlichen Lithiumprodukte werden international zum Vergleich als Lithiumkarbonatäquivalente (Lithium Carbonate Equivalent = LCE) dargestellt (Tab. 3.1). Als Sekundärlithium wird in dieser Studie das

Lithium bezeichnet, welches aus dem Recyclingprozess stammt (vgl. EU-Kommission, 2018; Meshram et al., 2014).

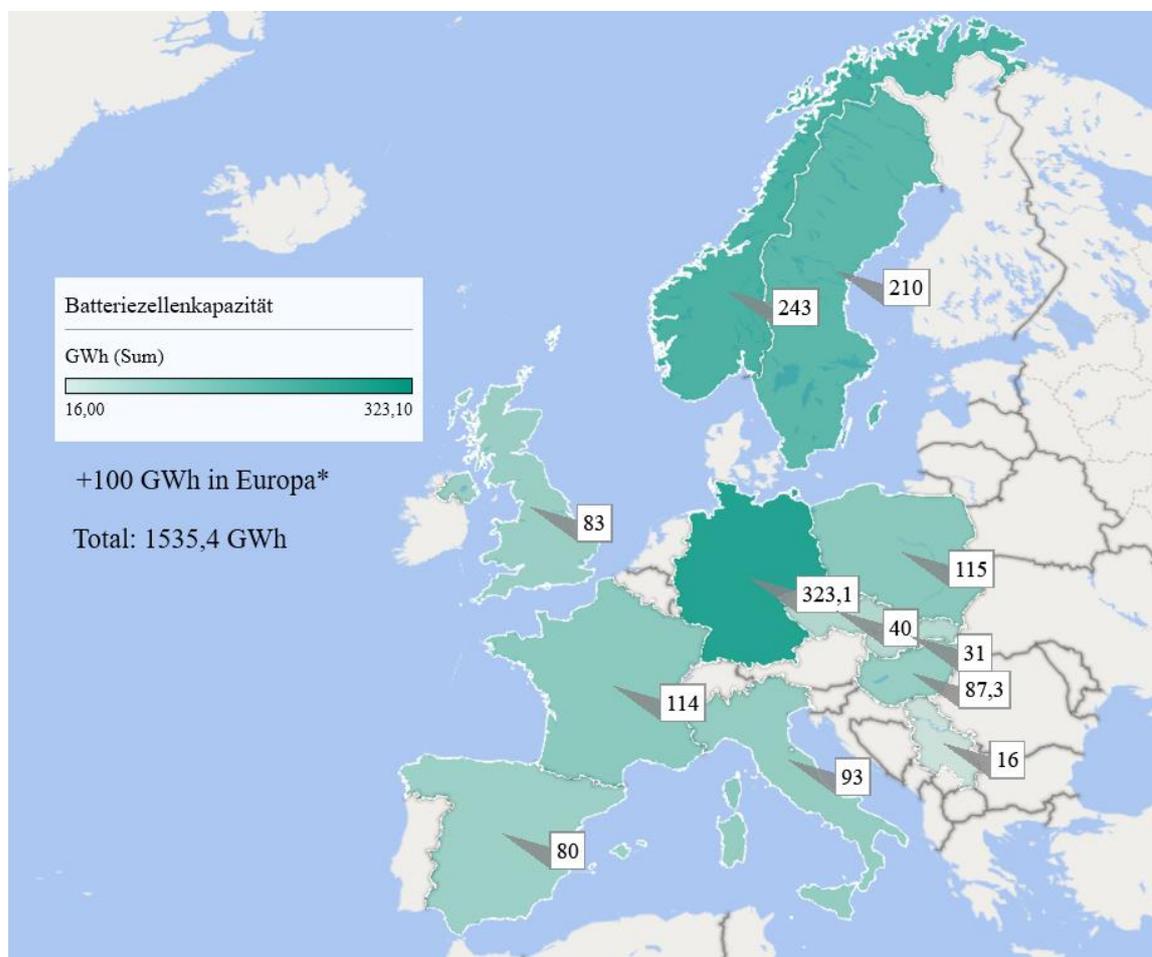
**Tabelle 3.1:** Umrechnungsfaktoren eines Lithiumprodukts in Lithiumkarbonatäquivalente (LCE) (s. z. B. Schmidt, 2017).

Lithiumprodukt	in 1 LCE
Lithium (Li)	5,323
Lithiumchlorid (LiCl)	0,871
Lithiumoxid (Li <sub>2</sub> O)	2,473
Lithiumkarbonat (Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	1,000
Lithiumhydroxid Monohydrat (LiOH·H <sub>2</sub> O)	0,880
Lithiumfluorid (LiF)	1,420

## 3.5 Ergebnisse

### 3.5.1 Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030

Es wurden 38 Produktionsstätten für Batteriezellen ermittelt, welche bis zum Jahr 2030 mit einer Batteriezellenproduktionskapazität von über 1,5 TWh in Europa errichtet werden sollen (Stand Juli 2022; Abb. 3.5; Anhang 7.3, Tab. 7.2). Die European Battery Alliance schätzte im Jahr 2021, dass sich bereits bis Mitte der 2020er-Jahre das Marktpotenzial für in Europa produzierte Batterien auf 250 Mrd. Euro belaufen werde (BMWi, 2021a). Das Ministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK, ehemals BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) gibt an, dass Deutschland und Europa zum Ziel haben, im Jahr 2030 30 % des Weltbedarfs an Batteriezellen heimisch zu produzieren (BMWK, 2022d).



**Abbildung 3.5:** Eigene Darstellung der geplanten maximalen Batteriezellenproduktionskapazitäten in GWh im Jahr 2030 in Europa nach Ländern (nach Anhang 7.3, Tab. 7.2). \*Europa: Der Volkswagen-Konzern plant insgesamt sechs Batteriezellenproduktionsstätten mit einer Gesamtkapazität von 240 GWh in Europa, für 100 GWh wurden die Standorte noch nicht genauer definiert (VW, 2022a).

Für den Standort Deutschland lassen sich zehn Batteriezellenproduzenten bestimmen (Stand Juli 2022; Tab. 3.2). Innerhalb dieses Jahrzehnts wollen diese zehn Unternehmen Batteriezellen für die E-Mobilität im industriellen Maßstab produzieren und teilweise die Kapazität in den Jahren nach dem Produktionsstart, noch vor dem Jahr 2030, erhöhen (Tab. 3.2). Ausgenommen von der Studie

sind Produktionsstandorte, die bereits produzierte Batteriemodule zusammensetzen oder Feststoff-Lithiumbatterien produzieren werden (vgl. BMW Group, 2021a; Volkswagen, 2022). Ob die Batteriezellenproduzenten in Deutschland die Elektrodenproduktion selbst übernehmen werden oder die Elektroden, für welche das Lithium benötigt wird, vom europäischen oder Weltmarkt zugekauft werden, kann derzeit nicht für alle Produzenten definiert werden (Stand Juli 2022). Die BASF wird Cellforce mit NMC-Kathodenmaterial aus Schwarzheide (Brandenburg, Deutschland) beliefern (BASF, 2021). Die Kathoden für den geplanten Northvolt Batteriezellenproduktionsstandort Heide, wie auch die für den Northvolt Standort in Göteborg, werden von Northvolt selbst an seinem Standort Northvolt Ett in Skellefteå, Schweden, produziert (Northvolt, 2022). Die Volkswagen-Gruppe möchte in einem Joint Venture mit Umicore die Kathoden für seine geplanten europäischen Batteriezellenproduktionsstätten selbst in Europa fertigen (Volkswagen, 2021).

**Tabelle 3.2:** Geplante Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 (nach Anhang 7.3, Tab. 7.2). \*Automotive Cell Company = ACC, ein Joint Venture von Stellantis, SAFT, Mercedes, Total.

Unternehmen	Hauptsitz	Standort	Beginn Produktionsstart	Kapazität zu Beginn [GWh]	Maximale Kapazität [GWh]
Automotive Cells Company*	Frankreich	Kaiserslautern	2025	13,4	40
Akasol	Deutschland	Darmstadt	2021	1	5
Blackstone Resources	Schweiz	Döbeln	2023	0,5	5
CATL	Volksrepublik China	Erfurt, Arnstadt	2022	8	14
Cellforce (Porsche)	Deutschland	Tübingen	2024	0,1	0,1
Gotion	Volksrepublik China	Göttingen	2023	3,5	18
Leclanché + Eneris Group	Frankreich	Willstätt	2025	0,12	1
Northvolt	Schweden	Heide	2025	60	60
Svolt	Volksrepublik China	Überherrn	2023	6	24
Volkswagen	Deutschland	Salzgitter	2025	20	40
<b>Total</b>				<b>112,62</b>	<b>207,1</b>

Zusätzliche Batteriezellen sollen in Deutschland auch vom US-amerikanischen Konzern Tesla produziert werden. Die Produktionsstätte für Batteriezellen von Tesla ist seit März 2022 genehmigt und befindet sich direkt neben der schon bestehenden Giga-Fabrik gerade im Bau (Land Brandenburg, 2022). Die Menge der zu produzierenden Batteriezellen von Tesla wurde vom Unternehmen nicht offiziell bekannt gegeben (Stand Juli 2022). Der amerikanisch-chinesische Batteriehersteller Microvast hat im Januar 2021 in Brandenburg, in Ludwigsfelde, einen Batterieproduktionsstandort eröffnet (Kluge, 2021). Des Weiteren gibt es Aussagen über Batteriezellstandorte von Varta (CIC energiGUNE, 2021). Auch wenn keine offiziellen Unternehmensangaben zu den genannten drei Batteriezellenproduktionsstandorten zu finden sind, werden diese für die Bestimmung einer maximalen Produktionskapazität in Deutschland im Jahr 2030 herangezogen (Tab. 3.3).

**Tabelle 3.3:** Weitere geplante Batteriezellenproduktionsstandorte in Deutschland im Jahr 2030 (nach Graupner, 2022; CIC energiGUNE, 2021).

Unternehmen	Standort	Produktionsstart	Kapazität [GWh]
Tesla	Grünheide	2023	100
VARTA	n. b.	2024	10
Microvast	Ludwigfelde	2021	6
<b>Total</b>			<b>116</b>

Durch die vorliegenden Kapazitätsdaten werden drei Batteriezellenproduktionsszenarien ( $S_n$ ) für das Jahr 2030 in Deutschland bestimmt. Es wird ein Mindest-Szenario  $S_1$  mit 112,62 GWh, was durch die Kapazitäten der zehn Batteriezellenproduktionsstandorte zu Beginn bestimmt wird, ein Mittel-Szenario  $S_2$  mit 207,1 GWh, was durch die möglichen Kapazitätserweiterungen der zehn Batteriezellenproduktionsstandorte bestimmt wird, und ein Maximal-Szenario  $S_3$  mit 323,1 GWh, was zur erweiterten Kapazität der zehn Unternehmen noch die Kapazitäten der drei Unternehmen ohne offizielle Unternehmensbekanntmachungen hinzuzählt, definiert (Tab. 3.4).

**Tabelle 3.4:** Szenarien der Batteriezellenproduktionskapazität in Deutschland im Jahr 2030.

Batteriezellenproduktions-szenario	Kapazität [GWh]	Erläuterung
Mindest-Szenario $S_1$	<b>112,62</b>	Die zehn geplanten Produktionsstätten behalten ihre Produktionskapazität wie zu Beginn bei (Tab. 3.1).
Mittel-Szenario $S_2$	<b>207,1</b>	Die Kapazitäten der geplanten zehn Produktionsstätten werden entsprechend der Maximalangaben der Betreiber ausgebaut werden (Tab. 3.1).
Maximum-Szenario $S_3$	<b>323,1</b>	Zur maximalen Kapazität aus $S_2$ kommen noch die möglichen Kapazitäten der Produzenten Microvast, Tesla und VARTA hinzu (Tab. 3.2).

Die Batteriezellenproduktionskapazitäten für Europa werden wie im Fall von Deutschland für drei Szenarien bestimmt (Stand Juli 2022; Tab. 3.5; Anhang 7.3, Tab. 7.2).

**Tabelle 3.5:** Szenarien der Batteriezellenproduktionskapazität in Europa im Jahr 2030.

Batteriezellenproduktions-szenario	Kapazität [GWh]	Erläuterung
Mindest-Szenario $S_1$	<b>828,67</b>	Berechnete Anfangskapazität aller Standorte in Europa (Anhang 7.3, Tab. 7.2).
Mittel-Szenario $S_2$	<b>1.419,4</b>	Berechnete Maximalkapazität aller Standorte in Europa (Anhang 7.3, Tab. 7.2).
Maximum-Szenario $S_3$	<b>1.535,4</b>	Zur maximalen Kapazität aus $S_2$ kommen noch die möglichen Kapazitäten der Produzenten Microvast, Tesla und VARTA hinzu (Tab. 3.2).

### 3.5.2 Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030

Der in diesem Kapitel berechnete Lithiumbedarf in t LCE soll gleichverstanden werden mit der Nachfrage nach den Lithiumchemikalien (Lithiumhydroxid Monohydrat und Lithiumkarbonat) für die Kathoden. In der Auftragsstudie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ der DERA werden die spezifischen Lithiummengen in verschiedenen Kathodentypen angegeben und ihr Marktanteil für das Jahr 2030 prognostiziert (Tab. 3.6, Marscheider-Weidemann et al., 2021).

**Tabelle 3.6:** Spezifische Lithiummenge verschiedener Kathodentypen (Stand Ende 2021) mit entsprechenden prognostizierten Marktanteilen im Jahr 2030 (Marscheider-Weidemann et al., 2021).

Kathodentechnologie	Kathodenkürzel	Lithium [kg/kWh]	Marktanteile im Jahr 2030
Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid	NMC 811	0,096	45 %
Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid	NMC 622	0,104	25 %
Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid	NCA 5	0,095	12 %
Hochenergie Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid	HE-NMC	0,123	10 %
Lithiumeisenphosphat	LFP	0,084	5 %
Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid	NMC 532	0,121	2 %
Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid	NMC 433	0,117	1 %

#### 3.5.2.1 Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030

Durch Multiplikation der angegebenen Marktanteile aus Tabelle 3.6 mit den Batteriezellenproduktionskapazitäten für Deutschland aus Tabelle 3.4 (Kap. 3.5.1) ergibt sich ein gerundeter Bedarf an Lithiumchemikalien für die deutsche Batteriezellenproduktion im Jahr 2030 in Höhe von 60,4 kt LCE in S<sub>1</sub>, 111,0 kt LCE in S<sub>2</sub> und 173,2 kt LCE in S<sub>3</sub> (Tab. 3.7).

**Tabelle 3.7:** Berechneter Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030.

Kathodenkürzel	Spezifische Lithiummenge [kg/kWh]	Marktanteil 2030	Minimum-Szenario S1: 112,62 GWh		Mittel-Szenario S2: 207,1 GWh		Maximum-Szenario S3: 323,1 GWh	
			Lithium [t]	t LCE	Lithium [t]	t LCE	Lithium [t]	t LCE
NMC 811	0,096	45 %	4.865	25.897	8.947	47.623	13.958	74.298
NMC 622	0,104	25 %	2.928	15.586	5.385	28.662	8.401	44.716
NCA 5	0,095	12 %	1.284	6.834	2.361	12.567	3.683	19.606
HE-NMC	0,123	10 %	1.385	7.374	2.547	13.559	3.974	21.154
LFP	0,084	5 %	473	2.518	870	4.630	1.357	7.223
NMC 532	0,121	2 %	273	1.451	501	2.668	782	4.162
NMC 433	0,117	1 %	132	701	242	1.290	378	2.012
Summe		100,0 %	11.340	<b>60.361</b>	20.853	<b>111.000</b>	32.533	<b>173.173</b>

### 3.5.2.2 Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030

Durch Multiplikation der angegebenen Marktanteile aus Tabelle 3.6 mit den Batteriezellenproduktionskapazitäten für Europa aus Tabelle 3.5 (Kap. 3.5.1) beläuft sich der Lithiumbedarf für die 38 angekündigten europäischen Batteriezellenproduktionsstätten gerundet auf 444,1 kt LCE in S<sub>1</sub>, 760,8 kt LCE in S<sub>2</sub> und 822,9 kt LCE in S<sub>3</sub> (Tab. 3.8).

**Tabelle 3.8:** Berechneter Lithiumbedarf in t LCE für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030.

Kathoden- kürzel	Spezifische Lithium- menge [kg/kWh]	Markt- anteile 2030	Minimum-Szenario 828,67 GWh		Mittel-Szenario 1.419,4 GWh		Maximum- Szenario 1.535,4 GWh	
			Lithium in t	t LCE	Lithium in t	t LCE	Lithium in t	t LCE
NMC 811	0,096	45 %	35.799	190.556	61.318	326.396	66.329	353.071
NMC 622	0,104	25 %	21.545	114.686	36.904	196.442	39.920	212.496
NCA 5	0,095	12 %	9.447	50.286	16.181	86.132	17.504	93.171
HE-NMC	0,123	10 %	10.193	54.255	17.459	92.932	18.885	100.527
LFP	0,084	5 %	3.480	18.526	5.961	31.733	6.449	34.326
NMC 532	0,121	2 %	2.005	10.675	3.435	18.284	3.716	19.779
NMC 433	0,117	1 %	970	5.161	1.661	8.840	1.796	9.562
<b>Summe</b>		<b>100,0 %</b>	<b>83.439</b>	<b>444.145</b>	<b>142.919</b>	<b>760.760</b>	<b>154.599</b>	<b>822.933</b>

### 3.5.3 Lithiumangebot in Europa

Im Jahr 2022 kann eine Nachfrage nach Lithium für die Batteriezellenproduktion in Deutschland nur aus Importen gedeckt werden. Bis zum Jahr 2030 könnte diese Quelle durch Primärlithium aus europäischen Projekten sowie einen Anteil an Sekundärlithium ergänzt werden. Um die in Europa verfügbaren Lithiumquellen zu diversifizieren, wird an weiteren Möglichkeiten geforscht, Lithium zu gewinnen. Vier weitere Methoden sind dem Anhang 7.4 zu entnehmen. Voraussetzung für eine durchgängige europäische Wertschöpfungskette von LIBs sind Raffinerien, in denen das Lithium veredelt werden kann, sowie Elektrodenproduktionsstätten.

#### 3.5.3.1 Primärlithium

##### Primärlithium aus Projekten im fortgeschrittenen Stadium

Stand Mai 2022 gibt es in der EU-27 sieben Projekte, die beabsichtigen, ab Mitte der 2020er-Jahre Lithium im industriellen Maßstab zu fördern (Tab. 3.9 und 3.10). Alle diese Projekte haben mindestens eine Konzeptstudie erarbeitet, oder bereits eine Vormachbarkeitsstudie oder Machbarkeitsstudie veröffentlicht. Sie werden aus diesem Grund als Projekte „im fortgeschrittenen Stadium“ bezeichnet. Die Projekte in Portugal, Deutschland, Tschechien, Österreich und Finnland sind an magmatische (Pegmatit, Granit und Greisen) Lagerstätten gebunden. Ein Projekt in Spanien ist in einer sedimentären Lagerstätte zu finden. Ein weiteres Projekt beabsichtigt, aus Geothermalwasser des Oberrheingrabens Lithium industriell zu fördern.

Das Projekt Mina do Baroso in Nordportugal von Savannah Resources Plc sieht vor, ab 2025 jährlich 175.000 t Spodumenkonzentrat mit 6 % Lithiumoxid zu fördern, was ca. 25.967 t LCE entspricht, als Nebenprodukte werden Feldspat und Quarz angegeben (Savannah Resources Plc, 2022; Savannah Resources Plc, 2021). Die Produktionslaufzeit wurde auf elf Jahre berechnet (Savannah Resources Plc, 2018). Die Weiterverarbeitung zu Lithiumhydroxid könnte in zwei geplanten Lithiumraffinieren in Portugal erfolgen (Savannah Resources Plc, 2022). Das Projekt Zinnwald der Zinnwald Lithium Plc hat eine Bergwerkslizenz bis 2047 und plant ab 2025 jährlich 5.112 t Lithiumfluorid (ca. 7.285 t LCE) sowie als Nebenprodukt Kaliumsulfat, ein Produkt für die Düngemittelindustrie, im Erzgebirge zu gewinnen (Bacanora Lithium Plc, 2019; Zinnwald Lithium Plc, 2021). In ihrer Investorenpräsentation vom März 2022 schreibt die Zinnwald Lithium Plc, dass sie die Lithiumchemikalien Lithiumhydroxid, Lithiumkarbonat und Lithiumfluorid in battery grade anbieten wird (Zinnwald Lithium Plc, 2022). Auf der anderen Seite der Landesgrenze, in Tschechien, befindet sich das Projekt Cínovec der European Metals Holding Ltd. Hier könnten auf Grundlage der Erzgehalte über 25 Jahre lang jährlich 29.386 t Lithiumhydroxid (ca. 25.860 t LCE) gefördert werden (European Metals Holding Ltd, 2022). Der Beginn der Produktion in Cínovec wird von Analysten für 2024 angenommen (S&P Global, 2021). Nach Unternehmensangaben soll eine Lithiumchemikalienanlage integriert werden (European Metals Holding Ltd., 2022). Das Projekt der European Lithium in Wolfsberg, Österreich, plant einen Produktionsbeginn für 2023 mit einer über mindestens zwölf und im besten Fall 25 Jahren andauernden jährlichen Produktion von ca. 10.129 t Lithiumhydroxid (ca. 8.914 t LCE) (European Lithium Ltd., 2021). In Finnland soll das Projekt Keliber ab 2026 für 16 Jahre 15.000 t Lithiumhydroxid (ca. 13.200 t LCE) fördern (Keliber, 2022). Das spanische Projekt San José der Infinity Corporation Ltd sieht vor, ab 2025 über 26 Jahre lang jährlich ca. 19.840 t Lithiumhydroxid (ca. 17.142 t LCE) zu produzieren (Infinity Lithium, 2021, 2022).

Die 2020 gegründete Vulcan Energie Ressourcen GmbH (VER), Tochterunternehmen der 2018 gegründeten australischen Vulcan Energy Resources, hat zum Ziel, ab 2024 auf deutscher Seite im Oberrheingraben Lithium aus Geothermalwasser im industriellen Maßstab zu fördern (VER, 2022). Das Geothermalwasser im Oberrheingraben weist Werte von maximal 181 mg Li/l auf, laut des Unternehmens werden Förderraten zwischen 100 l/s und 120 l/s pro Bohrloch erwartet (PFS, VER, 2020; VER, 2022). Die VER möchte neben der bereits angewandten Technologie der Wärme- und Stromerzeugung aus der Tiefengeothermie (400–5.000 m) ein direktes Lithiumextraktionsverfahren (DLE) zur Gewinnung von Lithiumchlorid in den Produktionskreislauf von zwei Geothermie-Anlagen in Landau und Insheim (Rheinland-Pfalz) einschalten (VER, 2022). Die angestrebte Extraktion mittels eines Sorbens hat in der kommerziellen Anwendung bei der Lithiumextraktion aus Salaren einen Technologiereifegrad (TRL) von 9 (VER, 2021). Insgesamt werden von der VER ca. 15.85 Mio. t LCE vermutete und angezeigte Ressourcen für ihre Lizenzen angenommen (VER, 2022a). Das durch die DLE-Anlagen extrahierte Lithiumchlorid soll in einer separaten Lithiumraffinerie im Chemiepark Höchst bei Frankfurt in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Nobian zu jährlich 15.000 t Lithiumhydroxid Monohydrat (ca. 13.200 t LCE) in Batteriequalität umgewandelt werden (VER, 2022, 2022b). Ab 2025 sollen jährlich weitere 25.000 t Lithiumhydroxid (ca. 22.000 t LCE) durch drei weitere Geothermie-Anlagen produziert werden (VER, 2022).

**Tabelle 3.9:** Daten der Lithiumprojekte (Stand Mitte 2022; nach Savannah Resources Plc, 2018, 2022; Bacanora, 2019; Zinnwald Lithium, 2021, 2022; Tagesschau, 2021; European Metals Holding Ltd, 2022; S&P Global, 2021; European Lithium Ltd., 2021; Keliber, 2022; Infinity Lithium, 2021, 2022; VER, 2020, 2022; Rio Tinto, 2020).

Unternehmen	Land	Projekt	Entwicklungsstadium	Produkt	Menge (t/Jahr)	Menge (LCE t/Jahr)	Produktionsbeginn	Erwartete Bergwerksproduktion in Jahren (LOM)	Lizenzdauer	Bergwerkslaufzeit Ende (Lizenz)
Savannah Resources	Portugal	Mina do Barroso	Konzeptstudie (2018)	Spodumenkonzentrat	175.000	25.967	2025	11	k. A.	2036
Deutsche Lithium	Deutschland	Zinnwald	Machbarkeitsstudie (2019)	LiF (LiOH·H <sub>2</sub> O, Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	5.112	7.285*	2025	k. A.	30	2047
European Metals	Tschechien	Cinovec	Vormachbarkeitsstudie (Update 2022)	LiOH·H <sub>2</sub> O	29.386	25.860	2024	25	k. A.	k. A.
European Lithium	Österreich	Wolfsberg	Vormachbarkeitsstudie (2018)	LiOH·H <sub>2</sub> O	10.129	8.914	2023	12 - 25	k. A.	k. A.
Keliber	Finnland	Keliber	Machbarkeitsstudie (Update 2022)	LiOH·H <sub>2</sub> O	15.000	13.200	2026	16	k. A.	k. A.
Infinity Lithium	Spanien	San Jose	Konzeptstudie (2021)	LiOH·H <sub>2</sub> O	19.480	17.142	2025	26	k. A.	k. A.
VER	Deutschland	Oberreingraben	Vormachbarkeitsstudie (2020)	LiOH·H <sub>2</sub> O	40.000	35.200	2025	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Total</b>						<b>133.567</b>				

\* In der Unternehmenspräsentation des Zinnwaldprojekts vom Juli 2021 wurden noch 7.285 t LCE im Jahr angegeben, allerdings auf der Basis einer Lithiumfluoridproduktion, die Möglichkeit zur Lithiumhydroxid- und Lithiumkarbonatproduktion wurde ohne Mengenangaben erwähnt (Zinnwald Lithium Plc, 2021). In der neuesten Unternehmenspräsentation des Zinnwaldprojekts (März 2022) wird zwar die flexible Produktion verschiedenster battery grade-Produkte wie Lithiumhydroxid, Lithiumkarbonat neben Lithiumfluorid benannt, allerdings sind keine Mengenangaben zu einer jährlichen Produktion angegeben (Zinnwald, 2022).

**Tabelle 3.10:** Übersicht über die Ressourcen- und Reservenangaben der Lithiumprojekte aus Festgestein (Stand Mitte 2022; nach Savannah Resources Plc, 2021; Bacanora, 2019; European Metals Holding Ltd, 2021; European Lithium Ltd., 2022; Keliber, 2021; Infinity Lithium, 2021).

Projekt	Gemessene Ressourcen (Mt)	Angezeigte Ressourcen (Mt)	Vermutete Ressourcen (Mt)	Summe Ressourcen (Mt)	Lithiumoxid (%)	LCE (Mt)	Nebenprodukte	Reserven (Mt)	Lithiumoxid (%)	LCE (Mt)
Mina do Barroso	6,6	8,4	12,0	27,0	1,06	0,71	Feldspat, Quarz	k. A.	k. A.	k. A.
Zinnwald	18,5	17,0	4,9	40,4	0,35	0,76	Wolfram, Zinn	31,2	0,3	0,5
Cinovec	53,3	360,2	294,7	708,2	0,42	7,39	Wolfram, Zinn	k. A.	k. A.	k. A.
Wolfsberg	2,9	3,4	4,7	11,0	1,00	0,27	Feldspat, Quarz	7,4	0,7	0,1
Keliber	4,3	9,4	1,9	15,6	1,05	0,41	k. A.	12,3	0,9	0,3
San Jose	k. A.	59,0	52,2	111,2	0,61	1,68	Zinn	k. A.	k. A.	k. A.
<b>Total</b>				<b>913,4</b>		<b>11,22</b>				

## Weitere Primärlithiumprojekte in Europa

Das Projekt von Rio Tinto im Jadar Becken in Serbien, eine sedimentäre Lagerstätte, wurde während der Recherchen aufgrund von Bedenken hinsichtlich möglicher Auswirkungen des Bergwerks auf die örtlichen Gemeinden eingestellt (Rio Tinto, 2022) und wird daher nicht in die Aufstellung der Angebotsszenarien für europäisches Primärlithium einbezogen. Laut Unternehmensangaben betragen die Ressourcen 139,2 Mio. t mit einem Lithiumoxidgehalt von 1,78 % und einem Bortrioxid-Gehalt von 14,7 %, die Reserven werden mit 16,6 Mio. t und einem Lithiumoxidgehalt von 1,81 % angegeben (Rio Tinto, 2020). Mit diesen Vorräten gab das Unternehmen eine jährliche Produktion von 55.000 t Lithiumkarbonat (battery grade) an (Rio Tinto, 2020). Ein weiteres Lithiumfördervorhaben in Serbien wird von dem Unternehmen Euro Lithium+Borates in Valjevo erarbeitet (EuroLithium, 2022). Das Projekt befindet sich noch im Anfangsstadium (Stand Oktober 2022) und wird daher ebenfalls nicht in die Studie einbezogen.

Es existieren weitere Projekte, die aus dem Geothermalwasser des Oberrheingrabens Lithium gewinnen möchten. Das Kooperationsprojekt der Energie Baden-Württemberg (EnBW), dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und weiteren Universitäts- und Wirtschaftspartnern forscht an einem geeigneten Sorptionsmittel und hat bereits eine Pilotanlage am EnBW-Standort Bruchsal aufgebaut (TRL 6-7) (Stand Oktober 2022; UnLimited, 2022, 2022a). Die Lithiumkonzentration im Geothermalwasser in 1,9 und 2,4 km Tiefe in Bruchsal liegt zwischen 159 mg/l und 166 mg/l bei einer Schüttungsrate von 24 l/s (Sanjuan, et al. 2016; ITG, 2022). Allerdings liegen noch keine Angaben zu den möglichen Lithiummengen vor, die industriell produziert werden können, daher wird dieses Projekt nicht in die Berechnung miteinbezogen.

Auf der französischen Seite des Oberrheingrabens wurde von 2019 bis 2021 das Projekt EuGeLi (European Geothermal Lithium Brines) ausgeführt (EIT Raw Materials, 2019; ERAMET, 2019). Bei dem vornehmlich durch die EIT Raw Materials finanzierten Projekt arbeiteten zehn Unternehmen und akademische Institutionen aus Frankreich, Belgien und Deutschland daran, Lithium mittels eines Adsorptionsmittels in Extraktionssäulen aufzufangen (EIT Raw Materials, 2020). Im Frühjahr 2021 gelang es dem Projektteam zum ersten Mal, Lithium aus Geothermalwasser aus 2,6 und 3,2 km Tiefe am Kraftwerk Rittershofen (Schüttungsrate 80 l/s) zu extrahieren (ERAMET, 2021; Bundesverband Geothermie, 2020). Das Projekt endete im Dezember 2021 mit dem erfolgreichen Resultat, dass einige Kilogramm an battery-grade-Lithiumkarbonat produziert wurden (BRGM, 2022).

Auch in England wird an der Förderung von Lithium aus Geothermalwässern gearbeitet. Cornish Lithium Ltd. gründete gemeinsam mit Geothermal Engineering Ltd. (GEL) das Joint Venture GeoCubed mit dem Zweck der Stromerzeugung, Wärmergewinnung und Lithiumextraktion in Cornwall, Südengland (GEO<sup>3</sup>, 2022). Im Juli 2021 gab das Unternehmen bekannt, dass das französische Startup Geolith SAS die Pilotanlage mit ihrer Lithium-Capt® Direct Lithium Extraction Technologie ausstatten wird (GEO<sup>3</sup>, 2021). Es ist geplant, dass die Pilotanlage 10 t LCE pro Jahr produziert und als Grundlage für die Hochskalierung einer industriellen Anlage dient (GEO<sup>3</sup>, 2021). Im August 2021 gab Geothermal Engineering Limited die bislang höchsten Lithiumkonzentrationen von 250 mg/l bekannt (Geothermal Engineering Ltd, 2021). Im Gegensatz zum Oberrheingraben befindet sich das Thermalwasser in Cornwall nicht in tiefliegenden Gesteinen, sondern zirkuliert oberflächennah (< 400 m) in lithiumreichem, zerklüftetem Granit

(Cornish Lithium, 2022). Das lithiumreiche Thermalwasser tritt an mehreren Stellen als warme Solen an der Oberfläche oder in aufgelassenen Bergwerken aus (Cornish Lithium, 2022).

### Primärlithiumangebot aus der EU-27 für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030

Vier Unternehmen der sieben fortgeschrittenen Projekte haben bereits Vereinbarungen mit unterschiedlichen Abnehmern geschlossen (Anhang 7.5, Tab. 7.3). Verbindliche Abnahmeverträge (binding offtake agreements) hat die VER mit LG Energy Solutions, Renault, Stellantis, Umicore und der Volkswagen-Gruppe geschlossen (VER, 2021 a-d, 2022c). Eine Ankündigung zur Erstellung eines verbindlichen Abnahmevertrags hat Savannah Resources mit dem portugiesischen Energieunternehmen Galp Energia publiziert (Savannah Resources, 2021a). Infinity Lithium veröffentlichte eine Absichtserklärung zur Abnahme (Memorandum of Understanding) mit LG Energy Solutions, jedoch ohne Mengenangaben (Infinity Lithium, 2022a). Eine Absichtserklärung zur Abnahme (MoU) zwischen der European Lithium und der BMW AG besteht seit August 2022, in dem BMW das Recht auf 100 % des produzierten Lithiumhydroxid Monohydrats zugestanden wird (European Lithium Ltd., 2022). Für die Berechnung des Lithiumangebots aus europäischen Lithiumquellen, welches theoretisch dem Markt noch zur Verfügung stehen könnte, werden daher Lithiummengen, die bereits Abnehmern, verbindlich oder nicht, zugesprochen wurden, nicht mit einkalkuliert und die Gesamtsumme von 133.567 t LCE (Tab. 3.9) um diese Mengen auf 76.470 t LCE reduziert (Tab. 3.11).

**Tabelle 3.11:** Potenzielles Lithiumangebot aus der EU-27 nach Abzug bereits vereinbarter Abnahmemengen (Stand August 2022; nach Savannah Resources Plc, 2022, 2021a; Zinnwald Lithium, 2021, 2022; Tagesschau, 2021; European Metals Holding Ltd, 2022; S&P Global, 2021; European Lithium Ltd., 2021, 2021a; Keliber, 2022; Infinity Lithium, 2021, 2022, 2022a; VER, 2021a-d, 2022, 2022c; Rio Tinto, 2020).

Unternehmen	Land	Projekt	Produkt	Menge (t/a)	Menge (LCE t/a)	Abnahme laut Vereinbarung (LCE t/a)	t LCE/a verfügbar
Savannah Resources	Portugal	Mina do Barroso	Spodumenkonzentrat	175.000	25.967	50 %	12.983
Deutsche Lithium	Deutschland	Zinnwald	LiF (LiOH, LiCO)	5.112	7.285	-	7.285
European Metals	Tschechien	Cinovec	LiOH	29.386	25.860	-	25.860
European Lithium	Österreich	Wolfsberg	LiOH	10.129	8.914	100 %	0
Keliber	Finnland	Keliber	LiOH	15.000	13.200	-	13.200
Infinity Lithium	Spanien	San Jose	LiOH	19.480	17.142	k. A.	17.142
VER	Deutschland	Oberheingraben	LiOH	40.000	35.200	36.197*	0
<b>Summe</b>					<b>133.567</b>		<b>76.470</b>

\* Anmerkung: Die Abnahmevereinbarungen der Vulcan Energie Ressourcen (VER, 2021a-d, 2022c) werden in den offiziellen Mitteilungen des Unternehmens jeweils mit einer Mindestabnahmemenge und einer maximalen Abnahmemenge von Lithiumhydroxid Monohydrat im jeweiligen Vertragszeitraum angegeben (Anhang 7.6, Tab. 7.4). 36.197 t LCE ergeben sich bei Umrechnung der Summe der Mindestabnahmemenge aus den bereits bekannten fünf Abnahmevereinbarungen (210.000 t LiOH·H<sub>2</sub>O) pro Jahr (41.133 t LiOH·H<sub>2</sub>O) mit dem Faktor 0,88.

Da auch das reduzierte Lithiumangebot (Tab. 3.11) nicht komplett für den deutschen Abnehmermarkt zur Verfügung stehen wird und ggf. geplante Lithiumförderprojekte nicht (rechtzeitig) realisiert werden können, werden an dieser Stelle drei Annahmen für die zur Verfügung stehende Lithiummenge aus der EU-27 für die Batteriezellenproduktion im Jahr 2030 in Deutschland gemacht (Tab. 3.12). Im ersten Szenario wird angenommen, dass keine Lithiummengen für die Batteriezellenproduktion in Deutschland zur Verfügung stehen werden. Für das zweite und dritte Szenario wird die gesamte geplante Batteriezellenproduktion in Europa herangezogen (Tab. 3.5) und der Anteil der Batteriezellenproduktion in Deutschland im Mittleren und Maximal-Szenario (Tab. 3.4) berechnet (Tab. 3.13).

**Tabelle 3.12:** Angebotsszenarien der Primärlithiummengen aus der EU-27 für die Batteriezellenproduktion im Jahr 2030 in Deutschland.

Szenario	Erläuterung
<b>Angebotsszenario Primärlithium P<sub>1</sub></b>	Die europäische Lithiumproduktion wird nicht für den Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion im Jahr 2030 in Deutschland zur Verfügung stehen. (Die Abnahmemengen von Stellantis (ACC) und VW von der VER sind auf der Angebots- wie auch Nachfrageseite berücksichtigt.)
<b>Angebotsszenario Primärlithium P<sub>2</sub></b>	Der Lithiumanteil, der für deutsche Batteriezellenproduktion aus dem Primärlithiumangebot der EU-27 für das Jahr 2030 angenommen wird, entspricht dem Marktanteil, den die Batteriezellenproduktion in Deutschland (ohne ACC & VW) an der europäischen Batteriezellenproduktion hat.
<b>Angebotsszenario Primärlithium P<sub>3</sub></b>	Der Lithiumanteil, der für deutsche Batteriezellenproduktion aus dem Primärlithiumangebot der EU-27 für das Jahr 2030 angenommen wird, entspricht dem Marktanteil, den die Batteriezellenproduktion in Deutschland an der europäischen Batteriezellenproduktion hat, inkl. jeweils der Kapazitäten von Microvast, Tesla und Varta.

**Tabelle 3.13:** Marktanteile der Batteriezellenproduktion in Deutschland an der Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030 in den Batteriezellenproduktionsszenarien S<sub>1</sub>–S<sub>3</sub>.

Angebots-szenario	Batteriezellenproduktion	Mindest-Szenario S <sub>1</sub>	Mittel-Szenario S <sub>2</sub>	Maximum-Szenario S <sub>3</sub>
<b>P<sub>2</sub></b>	Summe Europa in GWh	804,2	1382,0	1498,0
	Summe Deutschland in GWh	88,1	169,7	285,7
	<b>Prozentualer Anteil Deutschlands in Europa</b>	<b>3,6 %</b>	<b>13,7 %</b>	<b>15,1 %</b>
<b>P<sub>3</sub></b>	Summe Europa in GWh	828,67	1419,4	1535,4
	Summe Deutschland in GWh	112,62	207,1	323,1
	<b>Prozentualer Anteil Deutschlands in Europa</b>	<b>13,6 %</b>	<b>25,0 %</b>	<b>21,0 %</b>

Entsprechend Tabelle 3.12 und 3.13 werden neun Angebotsszenarien definiert, die von einem Lithiumangebot von 0–25 % aus europäischen Ressourcen reichen (Tab. 3.14).

**Tabelle 3.14:** Angebotsszenarien der Primärlithiummengen aus der EU-27 für die Batteriezellenproduktion im Jahr 2030 in Deutschland entsprechend der Batteriezellenproduktionszenarien.

Angebotsszenario	Batteriezellenproduktionskapazität	%
<b>P<sub>1</sub></b>	S <sub>1</sub>	<b>0,0 %</b>
	S <sub>2</sub>	<b>0,0 %</b>
	S <sub>3</sub>	<b>0,0 %</b>
<b>P<sub>2</sub></b>	S <sub>1</sub>	<b>3,6 %</b>
	S <sub>2</sub>	<b>13,7 %</b>
	S <sub>3</sub>	<b>15,1 %</b>
<b>P<sub>3</sub></b>	S <sub>1</sub>	<b>13,7 %</b>
	S <sub>2</sub>	<b>25,0 %</b>
	S <sub>3</sub>	<b>21,0 %</b>

### 3.5.3.2 Lithium aus Recycling

Um den Bedarf an Lithium für die Batterieproduktion zu decken, wird neben einer europäischen Lithiumproduktion auch der Einsatz von Rezyklaten angestrebt (EU-Kommission, 2020) und so auch in drei Szenarien für diese Studie angenommen. Gregoir und van Acker (2022) gehen davon aus, dass die Verfügbarkeit von Sekundärlithium für die Verarbeitung in neuen Batterien für die E-Mobilität in Europa erst nach 2030 zunehmen wird. Die IEA und IRENA sehen diese Entwicklung ebenfalls für den globalen Markt (IEA; 2021a; Gielen und Lyons, 2022). Daher wird als erstes Recyclingszenario ein Anteil von 0 % Sekundärlithium für die Deckung der Lithiumnachfrage für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 angenommen. Die DERA (2022) geht davon aus, dass der Anteil an Sekundärlithium für den europäischen Markt im Jahr 2030 zwischen 2,5 % und 10,6 % der Nachfrage liegen könnte, bei einer Batteriezellenproduktionskapazität von 1 TWh und einem Lithiumbedarf von ca. 386.000 t LCE für BEVs in Europa (Schmidt, 2022). Für das zweite Recyclingszenario R2 wird daher angenommen, dass 2,5 % der Nachfrage durch Sekundärlithium gedeckt werden können. Im dritten Recyclingszenario R3 wird angenommen, dass 4 % Sekundärlithium den Bedarf decken werden. Diese Annahme geht zurück auf einen Vorschlag der Europäischen Kommission (2020) (Tab. 3.15).

**Tabelle 3.15:** Recyclingszenarien jeweils in Abhängigkeit der Batteriezellenproduktionskapazitäten S<sub>1</sub>–S<sub>3</sub>.

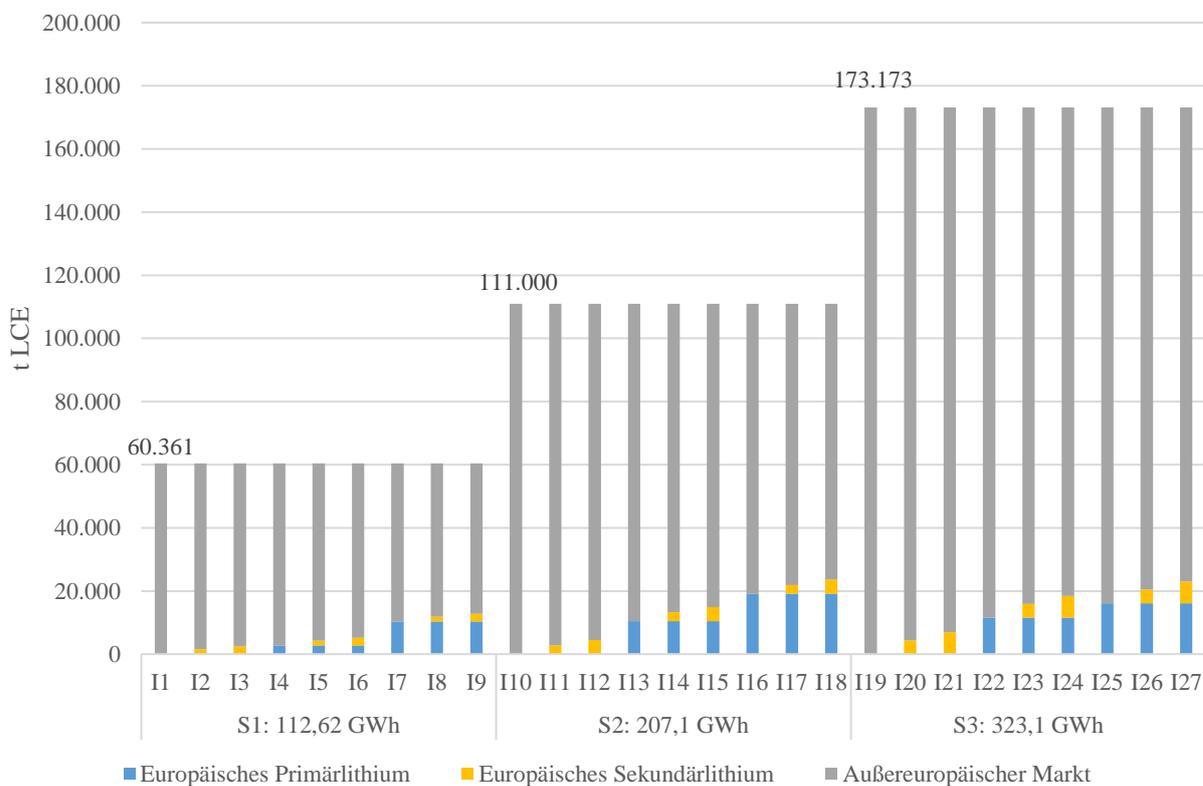
Recycling-szenario	Batteriezellen-produktionskapazitäten	EOL-RIR	Erläuterung
<b>R<sub>1</sub></b>	S <sub>1</sub>	0 %	Aufgrund einer verbleibend geringen Collection Rate (CR) und einer nicht ausgeführten EOL-RR gibt es kein Angebot an Sekundärlithium für die Produktion in Deutschland (vgl. Gregoir und van Acker, 2022; IEA, 2021a).
	S <sub>2</sub>		
	S <sub>3</sub>		
<b>R<sub>2</sub></b>	S <sub>1</sub>	2,5 %	Die europaweite CR beträgt 70 %. Bei einer EOL-RR von 25 % beträgt die EOL-RIR 2,5 %. Dadurch können 2,5 % der Nachfrage nach Lithium in LIBs durch recyceltes Lithium gedeckt werden (Schmidt, 2022).
	S <sub>2</sub>		
	S <sub>3</sub>		
<b>R<sub>3</sub></b>	S <sub>1</sub>	4,0 %	Nach einem Vorschlag der Europäischen Kommission (2020) zu Batterien und Altbatterien sollen ab dem 01.01.2030 4 % des Lithiums in einer Batterie Sekundärlithium sein, bei einer CR von 70 % und einer EOL-RR von 70 %.
	S <sub>2</sub>		
	S <sub>3</sub>		

### 3.5.4 Lithiumbedarfsdeckung

#### 3.5.4.1 Lithiumbedarfsdeckung für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030

##### Grundfall

Im Grundfall wird der Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktionskapazitäten  $S_1$ – $S_3$  (Tab. 3.4) berechnet. Zunächst werden die ermittelten Lithiumbedarfsmengen (Tab. 3.7) herangezogen. Diesen steht entsprechend der Angebots- und Nachfragegleichung (4) das Primärlithiumangebot aus den EU-27 gegenüber, das noch nicht über Vereinbarungen Abnehmern zugesprochen wurde (Tab. 3.12–3.14) sowie ein Sekundärlithiumangebot (Tab. 3.15). Entsprechend Gleichung (5) wird der Lithiumbedarf auf dem außereuropäischen Markt in 27 Szenarien berechnet (Abb. 3.6). Die ausführliche Szenarienaufstellung ist dem Anhang 7.7, Tab. 7.5 zu entnehmen.



**Abbildung 3.6:** Lithiumbedarf und Aufteilung der Lithiumnachfragedeckung für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Grundfall (Szenarienaufstellung in Anhang 7.7, Tab. 7.5).

Aufgrund der Annahmen, dass weder europäisches Primär- noch Sekundärlithium als Angebot zur Verfügung stehen kann, gibt es in jedem Szenario der Batteriezellenproduktionskapazität ( $S_1$ – $S_3$ ) ein Szenario, in dem die nachzufragende Menge vom außereuropäischen Markt (I) jeweils der benötigten Gesamtlithiummenge in  $S_1$ – $S_3$  entspricht ( $I_1 = 60.361$  t LCE,  $I_{10} = 111.000$  t LCE,  $I_{19} = 173.173$  t LCE) und damit die Eigenversorgungsmöglichkeit jeweils bei 0 % liegt. Die Szenarien, bei denen am wenigsten Lithium am außereuropäischen Markt nachgefragt werden muss, sind  $I_9$  in  $S_1$ ,  $I_{18}$  in  $S_2$  und  $I_{27}$  in  $S_3$ :

$I_9 = B(\text{Li})_{S1} - P_{31} - (R_3 * B(\text{Li})_{S1}) = 47.554 \text{ t LCE}$   
 (78,8 % vom außereuropäischen Markt, 21,2 % Eigenversorgung),

$I_{18} = B(\text{Li})_{S2} - P_{32} - (R_3 * B(\text{Li})_{S2}) = 87.449 \text{ t LCE}$   
 (78,8 % vom außereuropäischen Markt, 21,2 % Eigenversorgung),

$I_{27} = B(\text{Li})_{S3} - P_{33} - (R_3 * B(\text{Li})_{S3}) = 150.154 \text{ t LCE}$   
 (86,7 % vom außereuropäischen Markt, 13,3 % Eigenversorgung).

Da die Verfügbarkeit von Lithium aus den europäischen Projekten in jedem Szenario der Batteriezellenproduktionskapazität  $S_1$ – $S_3$  unterschiedlich angenommen wurde (Tab. 3.12–3.14), unterscheidet sich der prozentuale Anteil der europäischen Nachfrage an der jeweiligen Gesamtnachfrage und entsprechend auch die Quote der Deckung der Nachfrage durch europäisches Primär- und Sekundärlithium (Eigenversorgung).

**Praxisfall**

In diesem Praxisfall wird angenommen, dass die Lithiumhydroxid Monohydratmengen, die als Mindestabnahmemenge zwischen der VER und Stellantis (ca. 14.256 t LCE) und Volkswagen (ca. 5.984 t LCE) vereinbart wurden, dazu verwendet werden, um die Nachfrage für die Batteriezellenproduktion, welche die beiden Abnehmer in Deutschland planen, im Jahr 2030 zu bedienen. Folglich müssen diese vom jährlichen Lithiumbedarf für diese Produktionsstätten abgezogen werden. Mit dieser Annahme sinkt der jeweilige Lithiumbedarf in den Batteriezellenproduktionsszenarien der beiden Unternehmen entsprechend (Tab. 3.16).

**Tabelle 3.16:** Neu berechneter Lithiumbedarf für die Unternehmen Stellantis und Volkswagen entsprechend den Abnahmemengen mit der VER (Anhang 7.6).

Batteriezellenproduzent	ACC (Stellantis, SAFT, Mercedes, Total)	Volkswagen
Jährliche Mindestabnahmemengen in t LCE	14.256	5.984
Kapazität in $S_1$ in GWh	13,4	20
Li-Bedarf in $S_1$ in t LCE	7.182	10.719
Nicht gedeckt durch Abnahmevertrag in $S_1$	0	4.735
Kapazität in $S_2$ und $S_3$ in GWh	40	40
Li-Bedarf in $S_2$ und $S_3$ in t LCE	21.439	21.439
Nicht gedeckt durch Abnahmevertrag in $S_2$ und $S_3$	7.183	15.455

In der Konsequenz nimmt dadurch auch der Gesamtlithiumbedarf und entsprechend die Gesamtbatteriezellenproduktionskapazität in Deutschland für das Jahr 2030 ab. Der neue Lithiumbedarf beträgt 47.234 t LCE in  $S_1$ , 90.947 t LCE in  $S_2$  und 153.120 t LCE in  $S_3$  (Tab. 3.17). Die neuen Batteriezellenproduktionskapazitäten belaufen sich auf 89 GWh in  $S_{1\text{neu}}$ , 167,9 GWh in  $S_{2\text{neu}}$  und 285,7 GWh in  $S_{3\text{neu}}$  (Tab. 3.18).

**Tabelle 3.17:** Neu berechneter Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion 2030 in Deutschland für die drei Batteriezellenproduktionskapazitäten  $S_{1neu}$ – $S_{3neu}$ .

Kathoden-kürzel	Spezifische Lithium-menge [kg/kWh]	Markt-anteil 2030	Minimum-Szenario $S_{1neu}$ : 88 GWh		Mittel-Szenario $S_{2neu}$ : 169,7 GWh		Maximum-Szenario $S_{3neu}$ : 285,7 GWh	
			Lithium [t]	t LCE	Lithium [t]	t LCE	Lithium [t]	t LCE
NMC 811	0,096	45 %	3.807	20.265	7.330	39.020	12.342	65.694
NMC 622	0,104	25 %	2.291	12.197	4.412	23.484	7.428	39.538
NCA 5	0,095	12 %	1.005	5.348	1.934	10.297	3.257	17.336
HE-NMC	0,123	10 %	1.084	5.770	2.087	11.110	3.514	18.705
LFP	0,084	5 %	370	1.970	713	3.794	1.200	6.387
NMC 532	0,121	2 %	213	1.135	411	2.186	691	3.680
NMC 433	0,117	1 %	103	549	199	1.057	334	1.779
<b>Summe</b>		<b>100 %</b>	<b>8.874</b>	<b>47.234</b>	<b>17.086</b>	<b>90.947</b>	<b>28.766</b>	<b>153.120</b>

**Tabelle 3.18:** Neu berechnete Batteriezellenproduktionskapazitätswerte  $S_{1neu}$ – $S_{3neu}$ .

Batteriezellen-produzent	Mindest-Szenario $S_{1neu}$		Mittel-Szenario $S_{2neu}$		Maximal-Szenario $S_{3neu}$	
	Kapazität zu Beginn [GWh]	Kapazität zu Beginn - neu [GWh]	Maximale Kapazität [GWh]	Maximale Kapazität - neu [GWh]	Maximale Kapazität [GWh]	Maximale Kapazität - neu [GWh]
ACC	13,4	0,0	40,0	13,5	40,0	13,5
Akasol	1	1	5	5	5	5
Blackstone Resources	0,5	0,5	5	5	5	5
CATL	8	8	14	14	14	14
Cellforce (Porsche)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Gotion	3,5	3,5	18	18	18	18
Leclanché + Eneris Group	0,12	0,12	1	1	1	1
Microvast	0	0	0	0	6	6
Northvolt	60	60	60	60	60	60
Svolt	6	6	24	24	24	24
Tesla	0	0	0	0	100	100
VARTA	0	0	0	0	10	10
Volkswagen	20,0	8,9	40,0	29,1	40,0	29,1
<b>Summe</b>	<b>112,62</b>	<b>88,1</b>	<b>207,1</b>	<b>169,7</b>	<b>323,1</b>	<b>285,7</b>

Die Anpassung der Parameter der Angebots-Nachfragegleichung (4) hat zur Folge, dass die Lithiummengen, die am außereuropäischen Markt nachgefragt werden müssten (5), sich entsprechend verändern. Lithium muss weiterhin auf dem außereuropäischen Markt nachgefragt werden, damit alle Batteriezellenproduktionen im Jahr 2030 in Deutschland realisiert werden können (Abb. 3.7).

Wie im Grundfall sind auch im Praxisfall  $I_1$  in  $S_{1neu}$ ,  $I_{10}$  in  $S_{2neu}$  und  $I_{19}$  in  $S_{3neu}$  die Szenarien, in denen die nachzufragende Menge vom außereuropäischen Markt jeweils der benötigten Gesamtlithiummenge in  $S_{1neu}$ – $S_{3neu}$  entspricht und in welchen somit die

Eigenversorgungsmöglichkeit bei 0 % liegt. Die ausführliche Szenarienaufstellung ist dem Anhang 7.9, Tab. 7.6 zu entnehmen. Die Szenarien, bei denen am wenigsten Lithium am außereuropäischen Markt nachgefragt werden muss, sind ebenfalls I<sub>9</sub> in S<sub>1neu</sub>, I<sub>18</sub> in S<sub>2neu</sub> und I<sub>27</sub> in S<sub>3neu</sub> (Abb. 3.7):

$$I_9 = B(\text{Li})_{S1\text{neu}} - P_{31} - (R_3 * B(\text{Li})_{S1\text{neu}}) = 34.952 \text{ t LCE}$$

(74,0 % vom außereuropäischen Markt, 26,0 % Eigenversorgung),

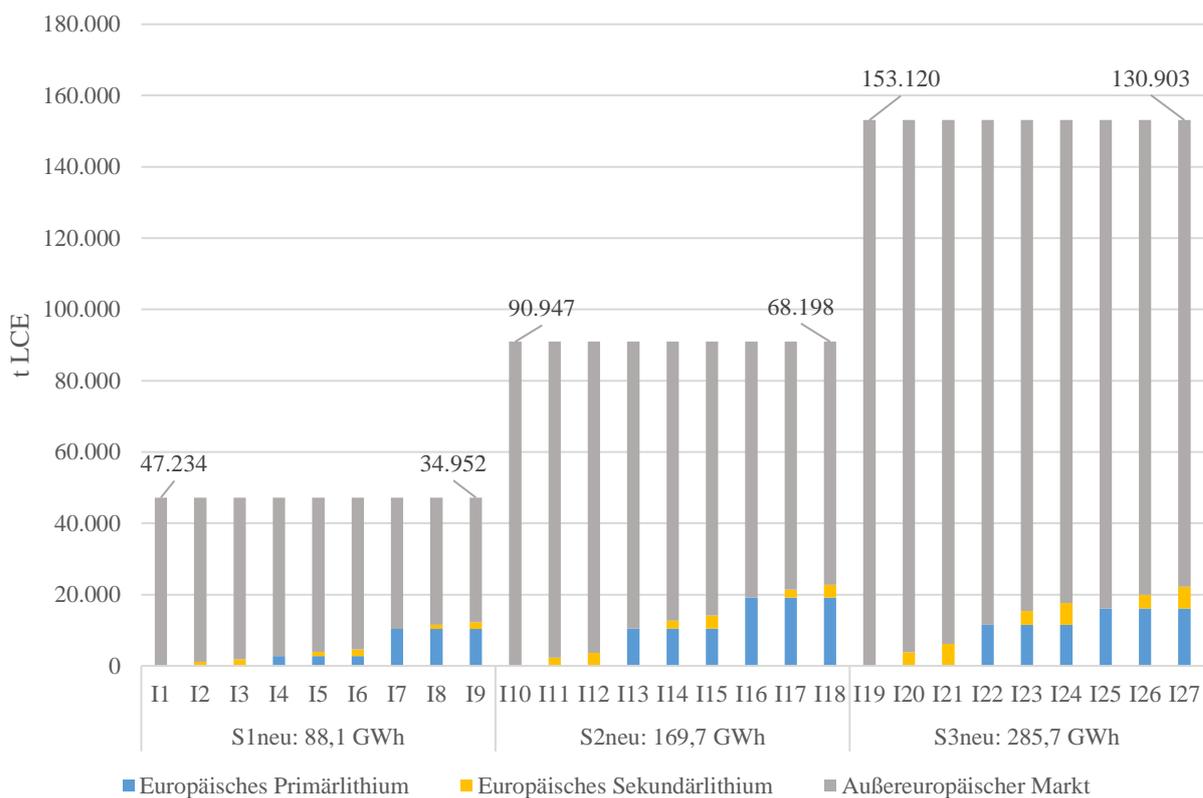
$$I_{18} = B(\text{Li})_{S2\text{neu}} - P_{32} - (R_3 * B(\text{Li})_{S2\text{neu}}) = 68.198 \text{ t LCE}$$

(75,0 % vom außereuropäischen Markt, 25,0 % Eigenversorgung),

$$I_{27} = B(\text{Li})_{S3\text{neu}} - P_{33} - (R_3 * B(\text{Li})_{S3\text{neu}}) = 130.903 \text{ t LCE}$$

(85,5 % vom außereuropäischen Markt, 14,5 % Eigenversorgung).

Auch im Praxisfall unterscheidet sich die Eigenversorgungsquote in jedem Szenario aufgrund der unterschiedlich angenommenen Verfügbarkeit von Primärlithium (Tab. 3.12–3.14). Die höchsten Eigenversorgungsquoten liegen zwischen 14,5 % in S<sub>3neu</sub> und 26,0 % in S<sub>1neu</sub>.



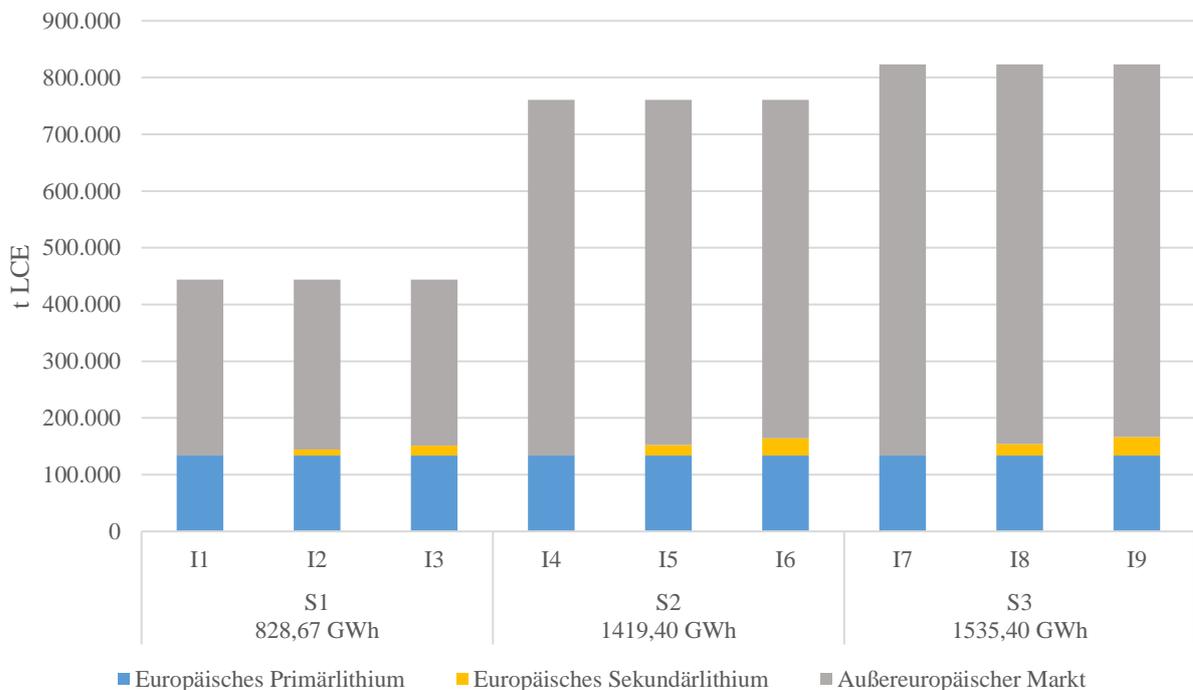
**Abbildung 3.7:** Lithiumbedarf und Aufteilung der Lithiumnachfragedeckung für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall. Das wenigste Lithium vom außereuropäischen Markt muss in den Fällen I<sub>9</sub> (34.952 t LCE) in S<sub>1neu</sub>, I<sub>18</sub> (68.198 t LCE) in S<sub>2neu</sub> und I<sub>27</sub> (130.903 t LCE) in S<sub>3neu</sub> beschafft werden (Szenarienaufstellung in Anhang 7.9, Tab. 7.6).

### 3.5.4.2 Lithiumbedarfsdeckung für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030

Für die Berechnung der Lithiumbedarfsdeckung am außereuropäischen Markt für die europäische Batteriezellenproduktion (Tab. 3.5; Anhang 7.15, Tab. 7.13) wird angenommen, dass das Primärlithium aus der EU-27 (Tab. 3.9) komplett zur Verfügung steht und das Angebot an Sekundärlithium auch in diesem Fall bei 0 %, 2,5 % oder 4 % (Tab. 3.15) liegt. Daraus ergeben sich neun Szenarien der Lithiumbedarfsmenge am außereuropäischen Markt (Tab. 3.19, Abb. 3.8). Die Eigenversorgung kann durch das Primär- und Sekundärlithiumangebot aus der EU-27 zwischen 16,2 % (I<sub>7</sub>) und 34,1 % (I<sub>3</sub>) liegen.

**Tabelle 3.19:** Szenarien zur Lithiumbedarfsdeckung für die europäische Batteriezellenproduktion im Jahr 2030.

Batteriezellenproduktionskapazität	Lithiumbedarf [t]	Szenario	Europäisches Primärlithium [t]	Europäisches Sekundärlithium [t]	Bedarf am außereuropäischen Markt [t]	Eigenversorgungsquote
S1: 828,67 GWh	444.145	I1	133.567	0	310.578	30,1 %
		I2	133.567	11.104	299.474	32,6 %
		I3	133.567	17.766	292.812	34,1 %
S2: 1419,40 GWh	760.760	I4	133.567	0	627.193	17,6 %
		I5	133.567	19.019	608.174	20,1 %
		I6	133.567	30.430	596.762	21,6 %
S3: 1535,40 GWh	822.933	I7	133.567	0	689.366	16,2 %
		I8	133.567	20.573	668.792	18,7 %
		I9	133.567	32.917	656.448	20,2 %



**Abbildung 3.8:** Eigenversorgung durch europäisches Primär- und Sekundärlithium und Bedarf auf dem außereuropäischen Markt für die europäische Batteriezellenproduktion im Jahr 2030 (Anhang 7.15, Tab. 7.13).

### 3.5.4.3 Preisannahmen

Lithiumkarbonat und Lithiumhydroxid Monohydrat werden am Referenzmarkt für Spezialchemikalien gehandelt (Schmidt, 2022). In den 1990er-Jahren kostete eine Tonne Lithiumkarbonat weniger als 4.000 US\$ (BGR, 2020a). Nachdem die Verwendung von Lithium für Batterien im Jahr 2015 die Verwendung in Keramik und Glas als Hauptendverwendung ablöste und es im Jahr 2016 eine temporäre Verknappung von australischem Spodumen gab, stieg der Preis für Lithiumkarbonat im Jahr 2016 um 300 % auf über 20.000 US\$/t im Vergleich zum Vorjahr (USGS, 2016, 2017). Im Jahr 2018 fiel der Preis für Lithiumkarbonat aufgrund eines Angebotsüberhangs wieder auf ca. 12.000 US\$/t, um bis zum Jahresende 2019 unter dem Einfluss des Beginns der COVID-19-Pandemie noch unter 10.000 US\$/t zu fallen (Abb. 3.9; USGS, 2016 - 2022). Zu Beginn des Jahres 2021 sank aufgrund eines Angebotsüberhangs nicht nur der Preis für Lithiumkarbonat, sondern auch der für Lithiumhydroxid Monohydrat bis auf ca. 7.000 US\$/t (USGS, 2022). Im Jahr 2021 wurden Lithiumpreisprognosen für das Jahr 2025 für Lithiumhydroxid Monohydrat von ca. 17.000 US\$/t und für Lithiumkarbonat „battery-grade“ von ca. 15.000 US\$/t aufgestellt (Fitch Solutions, 2021). Im November 2021 wurden Preise von 27.400 US\$/t (cif<sup>12</sup> North Asia) für Lithiumhydroxid Monohydrat und von 26.200 US\$/t (cif North Asia) für Lithiumkarbonat notiert (USGS, 2022), sodass Ende 2021 Analysten basierend auf der rasch wachsenden Nachfrage bereits für das Jahr 2022 durchschnittliche Preise für Lithiumhydroxid von 20.812 US\$/t und für Lithiumkarbonat von 21.000 US\$/t prognostizierten (Goldinvest, 2021). Die Preissteigerung in 2022, welche zunächst getrieben wurde durch den steigenden Bedarf und sich dann als Folge des Kriegs Russlands gegen die Ukraine weiterentwickelte, lag bis einschließlich August 2022 fast beim Vierfachen des Vorjahres (Tab. 3.20).

**Tabelle 3.20:** Auflistung verschiedener Preisangaben für Lithiumhydroxid Monohydrat und Lithiumkarbonat im Jahr 2022 (VER, 2022d, e; Argus Media Group, 2022, 2022a; Schmidt, 2022).

Quelle	Bezugszeitraum	Lithiumhydroxid, min 56,5 %, battery grade	Lithiumkarbonat, min 99,5 %, battery grade
VER	Januar 2022	33.000 US\$/t (average from different providers)	
Argus Media Group	29. April 2022	71.500 US\$/t (fob China)	61.000 US\$/t (cif China)
VER	April 2022	80.250 US\$/t (average from different providers)	
DERA	April 2022	ca. 71.812 US\$/t	ca. 71.340 US\$/t
DERA	Mai 2022	ca. 69.250 US\$/t	ca. 68.625 US\$/t
VER	Juli 2022	75.000 US\$/t (spot price, cif China, Japan, Korea)	
Argus Media Group	12. August 2022	78.500 US\$/t (fob China)	61.500 US\$/t (cif China)

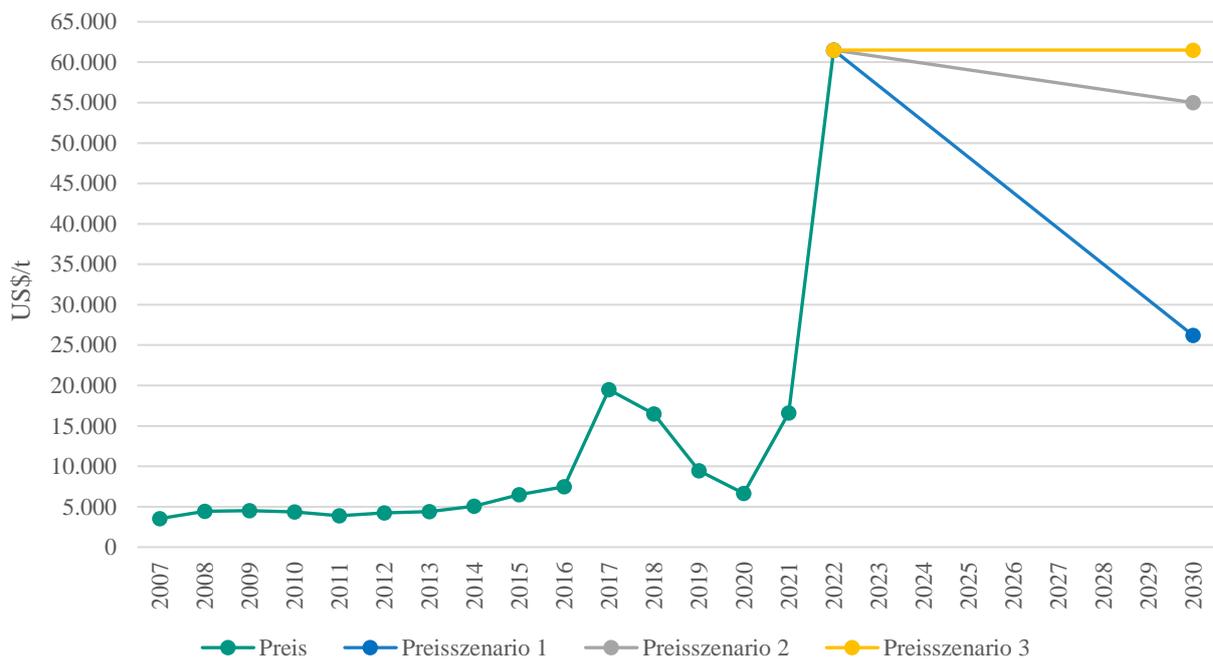
Nach Prognosen von Fitch Solutions vom August 2022 könnte für das Jahr 2023 der Preis von Lithiumhydroxid Monohydrat 56.000 US\$/t und für Lithiumkarbonat (99,5 %) 55.000 US\$/t betragen (Goldinvest, 2022). Preisprognosen auf dynamischen Rohstoffmärkten erfordern die Einbeziehung zahlreicher Faktoren (Maxwell, 2015; Martin et al., 2017). Für die Berechnung der monetären Größe der notwendigen Lithiumnachfrage auf dem außereuropäischen Markt für die

<sup>12</sup> Incoterm: International Commercial Terms, von der internationalen Handelsorganisation festgelegte internationale Logistikstandards. cif = cost, insurance and freight; fob = free on board.

Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 werden drei vereinfachte Preisszenarien angenommen (Tab. 3.21). Es wird im ersten Preisszenario  $K_1$  ein Preisumfeld, das den Preisen vom November 2021 vor dem Ausbruch des Russland-Ukraine-Kriegs entspricht, angenommen (USGS, 2022). Es stellt das niedrigste Preisumfeld der drei Annahmen dar, da es zwischen August 2022 und dem Jahr 2030 weitere marktwirtschaftliche Veränderungen geben kann. Dazu zählen ein (unerwarteter) weiterer Angebotsüberhang, der den Preis nicht weiter steigen bzw. wieder fallen lassen könnte. Im zweiten Preisszenario  $K_2$  wird ein Preisumfeld, welches den Vorhersagen aus August 2022 für 2023 entspricht (Goldinvest, 2022), angenommen. Für das dritte Preisszenario  $K_3$  wird ein Preisumfeld, entsprechend den tatsächlichen Marktpreisen vom August 2022, angenommen (Argus Media Group, 2022a) (Tab. 3.21). Internationale Logistikstandards werden außenvorgelassen. Abbildung 3.9 stellt die Preisentwicklung von Lithiumkarbonat und die angenommenen Preise für das Jahr 2030 dar.

**Tabelle 3.21:** Preisszenarien für die monetäre Bewertung der notwendigen Lithiumnachfrage auf dem außereuropäischen Markt (USGS, 2022; Goldinvest, 2022; Argus Media Group, 2022a).

Preisszenario	Lithiumhydroxid Monohydrat, battery grade	Lithiumkarbonat, battery grade	Bezugszeitraum
Preisszenario $K_1$	27.400	26.200	Preisniveau November 2021
Preisszenario $K_2$	56.000	55.000	Prognose für 2023
Preisszenario $K_3$	78.500	61.500	Preisniveau August 2022



**Abbildung 3.9:** Preisentwicklung von Lithiumkarbonat (für die Jahre 1991 bis 2002 und 2017 bis 2021: USGS, 1991–2022; für die Jahre 2003 bis 2016: Metalary, 2022) und Prognose (aus Tab. 3.20) für das Jahr 2030.

Des Weiteren wird für die Elektrodenproduktion ein Marktverhältnis von 63,4 % der Menge Lithiumhydroxid Monohydrat (min. 56,5 %, battery grade) und 36,6 % der Menge Lithiumkarbonat (min. 99,5 %, battery grade) angenommen. Dieses Marktverhältnis wurde auf Basis von zwei Angaben zur Verwendung der Lithiumchemikalien in den Kathoden aus der Literatur berechnet. Kelly et al. (2021) beschreiben, dass für die Kathode NMC811 typischerweise Lithiumhydroxid

Monohydrat und für eine NMC622 Lithiumkarbonat verwendet wird. Skaliert man die prognostizierten Marktanteile einer NMC811 (45 %) und einer NMC622 (25 %) für das Jahr 2030 (Tab. 3.6, Marscheider-Weidemann et al., 2021), die in dieser Studie verwendet werden, hoch, ergibt dies ein Lithiumhydroxid Monohydrat zu Lithiumkarbonat Verhältnis von 64,3 % zu 35,7 %. Gielen und Lyons (2022) beschreiben ein aktuelles Marktverhältnis von 62,5 % Lithiumhydroxid Monohydrat und 37,5 % Lithiumkarbonat. Der Durchschnitt aus dem berechneten und veröffentlichten Marktverhältnis ergibt 63,4 % für Lithiumhydroxid Monohydrat und 36,6 % für Lithiumkarbonat. Die Kosten der nachzufragenden Mengen an Lithiumhydroxid Monohydrat und Lithiumkarbonat am außereuropäischen Markt liegen bei dem angenommenen Marktverhältnis von 63,4 % und 36,6 % im Grundfall zwischen 1.183 Mio.US\$ in K<sub>1</sub> und 11.482 Mio.US\$ in K<sub>3</sub>, im Praxisfall zwischen 869 Mio.US\$ in K<sub>1</sub> und 10.153 Mio.US\$ in K<sub>3</sub>. Die Kosten für die Beschaffung auf dem außereuropäischen Markt für den gesamten europäischen Bedarf liegen zwischen 7.284 Mio.US\$ in K<sub>1</sub> und 45.709 Mio.US\$ in K<sub>3</sub> (Tab. 3.22).

**Tabelle 3.22:** Kosten des Lithiumbedarfs am außereuropäischen Markt für den Grundfall, den Praxisfall und Europa in den Szenarien mit dem minimalen und dem maximalen Bedarf am außereuropäischen Markt.

Importszenario, in Mio. US\$	Minimaler Bedarf			Maximaler Bedarf		
	I <sub>9</sub> Grundfall	I <sub>9</sub> Praxisfall	I3 Europa	I <sub>19</sub> Grundfall	I <sub>19</sub> Praxisfall	I7 Europa
Kosten in K <sub>1</sub>	1.183	869	7.284	4.308	3.809	17.149
Kosten in K <sub>2</sub>	2.443	1.796	15.043	8.897	7.866	35.415
Kosten in K <sub>3</sub>	3.153	2.318	19.415	11.482	10.153	45.709

#### 3.5.4.4 Sensitivitätsanalyse

##### Reduktion des Lithiumverbrauchs

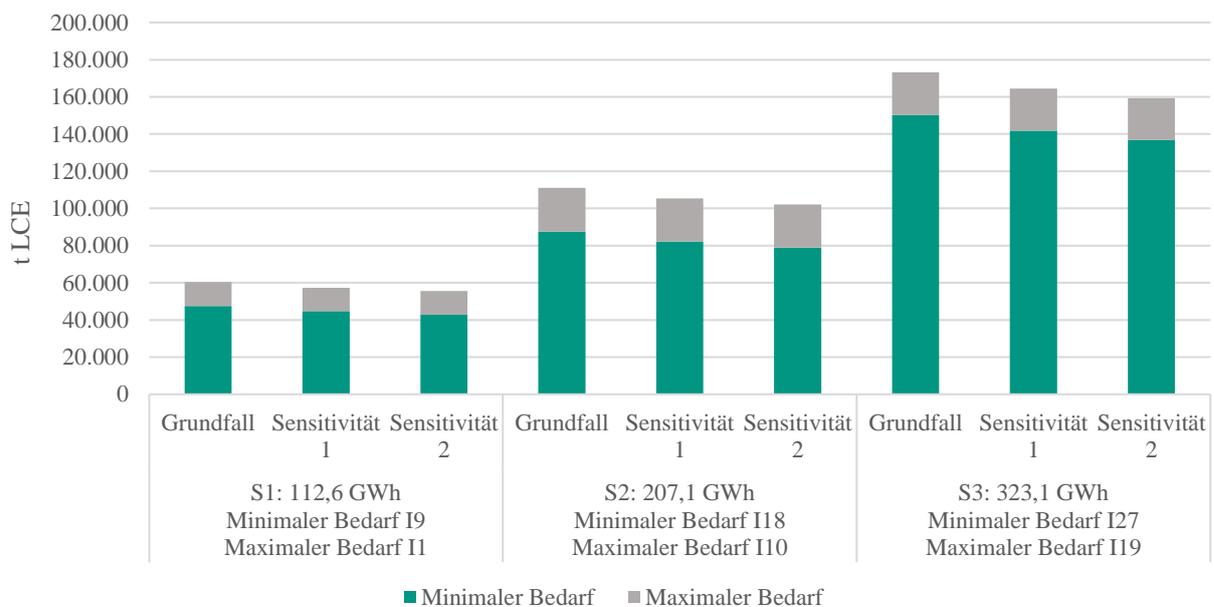
Basierend auf vergangenen und prognostizierten Mengen- und Prozentangaben aus der Literatur werden die Raten der Lithiumreduktion in den Kathodentechnologien bestimmt. Zunächst wird durch einen Vergleich der in dieser Studie verwendeten Mengenangaben (kg/kWh) zum Lithiumverbrauch in den verschiedenen Kathodentechnologien (Marscheider-Weidemann et al., 2021) mit den Mengenangaben (kg/kWh) der IEA (2018) die Reduktion des Lithiumverbrauchs innerhalb von drei Jahren berechnet (Tab. 3.23). Des Weiteren wird die Studie „Minerals for Climate Action“ der Weltbank (Hund et al., 2020) herangezogen. Die Weltbank gibt eine Effizienzsteigerung im Lithiumverbrauch bis zum Jahr 2050 von 23 % an (Hund et al., 2020, S. 64). Nimmt man vereinfacht eine lineare Steigerungsrate zwischen dem Jahr 2020 und 2050 für die Effizienzangaben der Weltbank an, so kann für das Jahr 2030 eine Effizienzsteigerung mit einer Reduktion des Lithiumverbrauchs in den Kathodentechnologien von ca. 8 % kalkuliert werden. Diese Annahme stützt die Hypothese, dass es keine Effizienzsteigerung im zweistelligen Bereich bis 2030 im Lithiumverbrauch geben wird. Daher wird beim Vergleich der Zahlen der IEA (2018) mit denen von Marscheider-Weidemann et al. (2021) der geringste Effizienzsteigerungsprozentsatz von 5 % herangezogen. Die Sensitivität „Reduktion des Lithiumverbrauchs“ wird daher für den Grundfall, den Praxisfall und Europa mit 5 % (Sensitivität 1) und 8 % (Sensitivität 2) untersucht.

**Tabelle 3.23:** Berechnung der Effizienzsteigerungsraten für den Lithiumverbrauch in unterschiedlichen Kathodentechnologien im Jahr 2030 (Marscheider-Weidemann et al., 2021; IEA, 2018; Hund et al., 2020).

Kürzel	Spezifische Li-Menge [kg/kWh] (Marscheider-Weidemann et al., 2021)	Spezifische Li-Menge [kg/kWh] (IEA, 2018)	Effizienzsteigerung zwischen 2018 und 2021 [%]	23 %-ige Effizienzsteigerung bis 2050 [Li/kWh] (Hund et al., 2020)	Min. Effizienzsteigerung mit 5 % bis 2030 = Sensitivität 1 [Li/kWh]	Max. Effizienzsteigerung mit 8 % bis 2030 = Sensitivität 2 [Li/kWh]
NMC 811	0,096	0,110	13 %	0,074	<b>0,091</b>	<b>0,088</b>
NMC 622	0,104	0,130	20 %	0,080	<b>0,099</b>	<b>0,096</b>
NCA 5	0,095	0,100	<b>5 %</b>	0,073	<b>0,090</b>	<b>0,087</b>
HE-NMC	0,123	k. A.	k. A.	0,095	<b>0,117</b>	<b>0,113</b>
LFP	0,084	0,100	16 %	0,065	<b>0,080</b>	<b>0,077</b>
NMC 532	0,121	0,140	14 %	0,093	<b>0,115</b>	<b>0,111</b>
NMC 433	0,117	0,140	16 %	0,090	<b>0,111</b>	<b>0,108</b>
Durchschnitt	0,106	0,120	14 %	0,081	<b>0,100</b>	<b>0,097</b>

### Grundfall

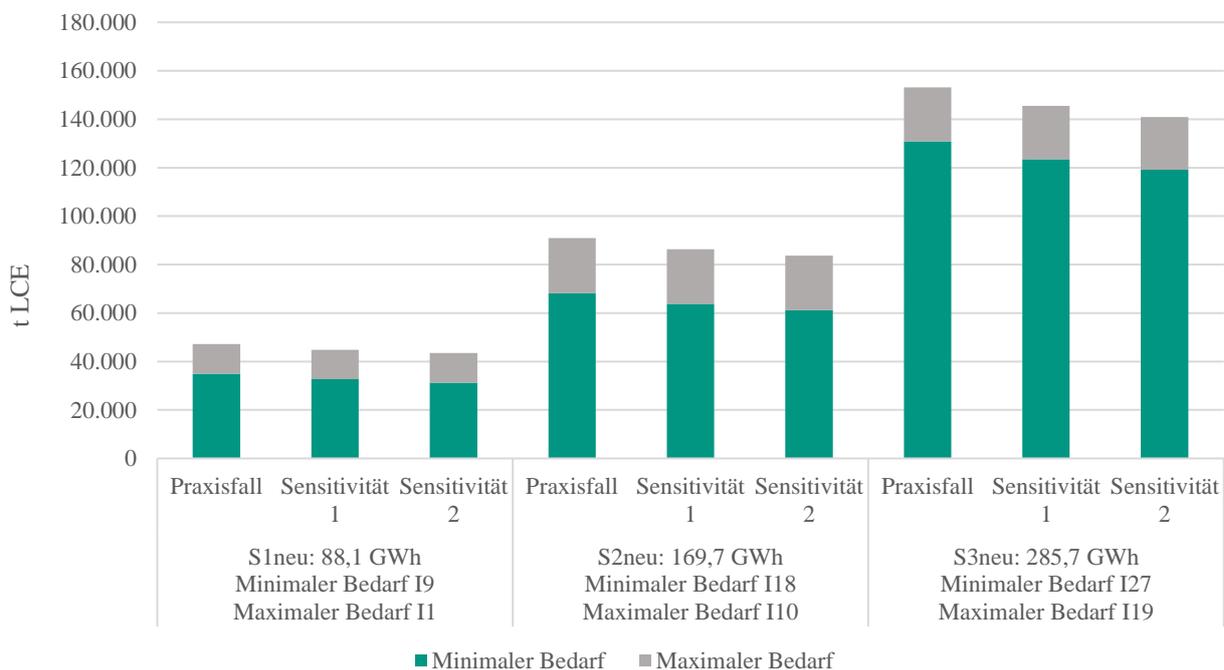
Bei einer Effizienzsteigerung mit einer Reduktion von 5 % des Lithiumverbrauchs für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 bei gleichbleibendem Angebot an europäischem Primärlithium (Sensitivität 1) verringert sich die Lithiummenge, die am außereuropäischen Markt im Grundfall nachgefragt werden muss, zwischen 5 % (in I<sub>1</sub>, I<sub>10</sub> und I<sub>19</sub>) und maximal 6,1 % in I<sub>9</sub>, bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs um 8 % (Sensitivität 2) zwischen 8 % (in I<sub>1</sub>, I<sub>10</sub> und I<sub>19</sub>) und maximal 9,7 % in I<sub>9</sub> (Abb. 3.10). Die Eigenversorgungsquote kann bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs von 5 % von maximal 21,2 % um 0,9 %-Punkte auf 22,1 % in I<sub>9</sub> erhöht werden, bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs von 8 % um 1,5 %-Punkte auf 22,7 % in I<sub>9</sub>.



**Abbildung 3.10:** Durch Effizienzsteigerung mit einer Reduktion des Lithiumverbrauchs (-5 % und -8 %) reduzierte Lithiumbedarfsmenge am außereuropäischen Markt für den Grundfall in den Szenarien des minimalen (I<sub>9</sub>, I<sub>18</sub>, I<sub>27</sub>) und maximalen Bedarfs (I<sub>1</sub>, I<sub>10</sub>, I<sub>19</sub>). (Szenarienaufstellung in Anhang 7.9, Tab. 7.7 und Anhang 7.11, Tab. 7.9).

## Praxisfall

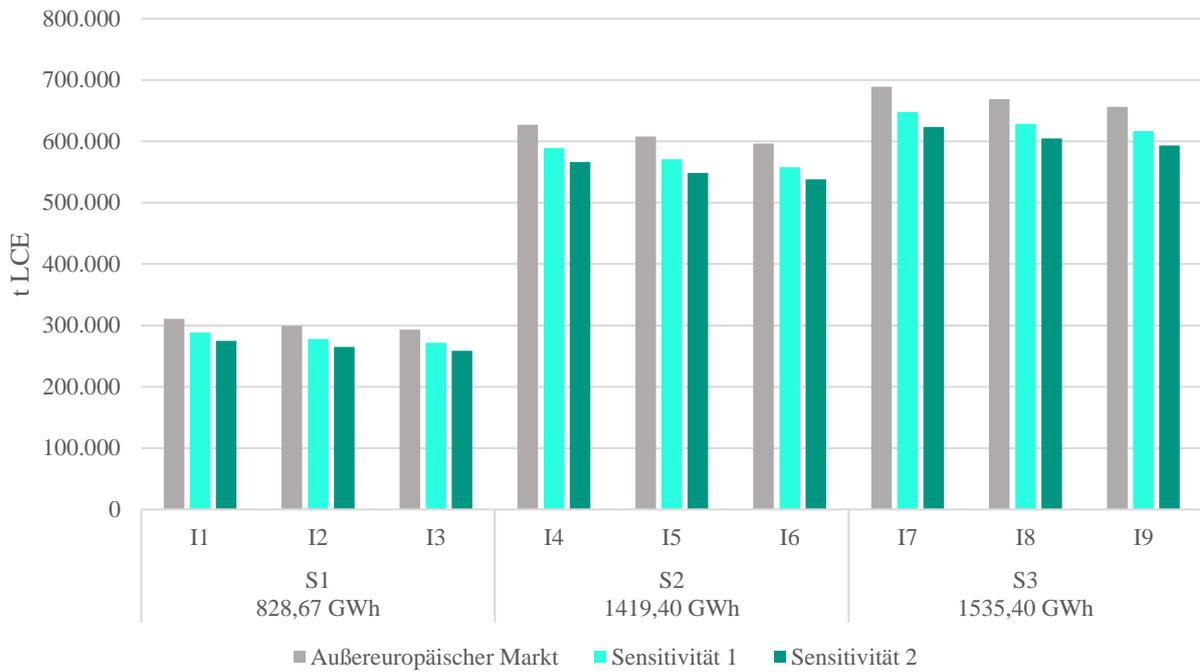
Bei einer Effizienzsteigerung mit einer Reduktion von 5 % des Lithiumverbrauchs für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030, aber gleichbleibendem Angebot an europäischem Primärlithium (Sensitivität 1) verringert sich die Lithiummenge, die am außereuropäischen Markt im Praxisfall nachgefragt werden muss, zwischen 5 % (in I<sub>1</sub>, I<sub>10</sub> und I<sub>19</sub>) und maximal 6,5 % in I<sub>9</sub>, bei einer Effizienzsteigerung mit einer Reduktion des Lithiumverbrauchs um 8 % (Sensitivität 2) (in I<sub>1</sub>, I<sub>10</sub> und I<sub>19</sub>) zwischen 8 % und maximal 10,4 % in I<sub>9</sub> (Abb. 3.11). Die Eigenversorgungsquote kann bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs von 5 % von maximal 26,0 % um 1,2 %-Punkte auf 27,2 % erhöht werden, bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs von 8 % um 1,9 %-Punkte auf 27,9 %.



**Abbildung 3.11:** Durch Effizienzsteigerung mit einer Reduktion des Lithiumverbrauchs (-5 % und -8 %) reduzierte Lithiumbedarfsmenge am außereuropäischen Markt für den Praxisfall in den Szenarien des minimalen (I<sub>9</sub>, I<sub>18</sub>, I<sub>27</sub>) und maximalen Bedarfs (I<sub>1</sub>, I<sub>10</sub>, I<sub>19</sub>). (Szenarienaufstellung in Anhang 7.10, Tab. 7.8 und Anhang 7.12, Tab. 7.10).

## Europa

Bei einer Effizienzsteigerung mit einer Reduktion von 5 % des Lithiumverbrauchs für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030, aber gleichbleibendem Angebot an europäischem Primärlithium (Sensitivität 1) verringert sich die Lithiummenge, die am außereuropäischen Markt nachgefragt werden muss, zwischen 6 % und 7,3 %, von 689.366 t LCE auf 648.219 t LCE in I<sub>7</sub> (maximaler Bedarf) und von 292.812 t LCE auf 271.493 t LCE in I<sub>3</sub> (minimaler Bedarf), bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs um 8 % (Sensitivität 2) zwischen 9,6 % und maximal 11,6 % von 689.366 t LCE auf 623.531 t LCE in I<sub>7</sub> und von 292.812 t LCE auf 258.701 t LCE in I<sub>3</sub> (Abb. 3.12). Die Eigenversorgungsquote kann bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs von 5 % von maximal 34,1 % um 1,6 %-Punkte auf maximal 35,7 % in I<sub>3</sub> erhöht werden, bei einer Reduktion des Lithiumverbrauchs von 8 % um 2,6 %-Punkte auf maximal 36,7 % in I<sub>3</sub>.



**Abbildung 3.12:** Durch Effizienzsteigerung mit einer Reduktion des Lithiumverbrauchs (-5 % und -8 %) reduzierte Lithiumbedarfsmenge am außereuropäischen Markt für Europa (Anhang 7.16, Tab. 7.14).

### Reduktion des Lithiumverbrauchs und Effizienzsteigerungen im Recycling

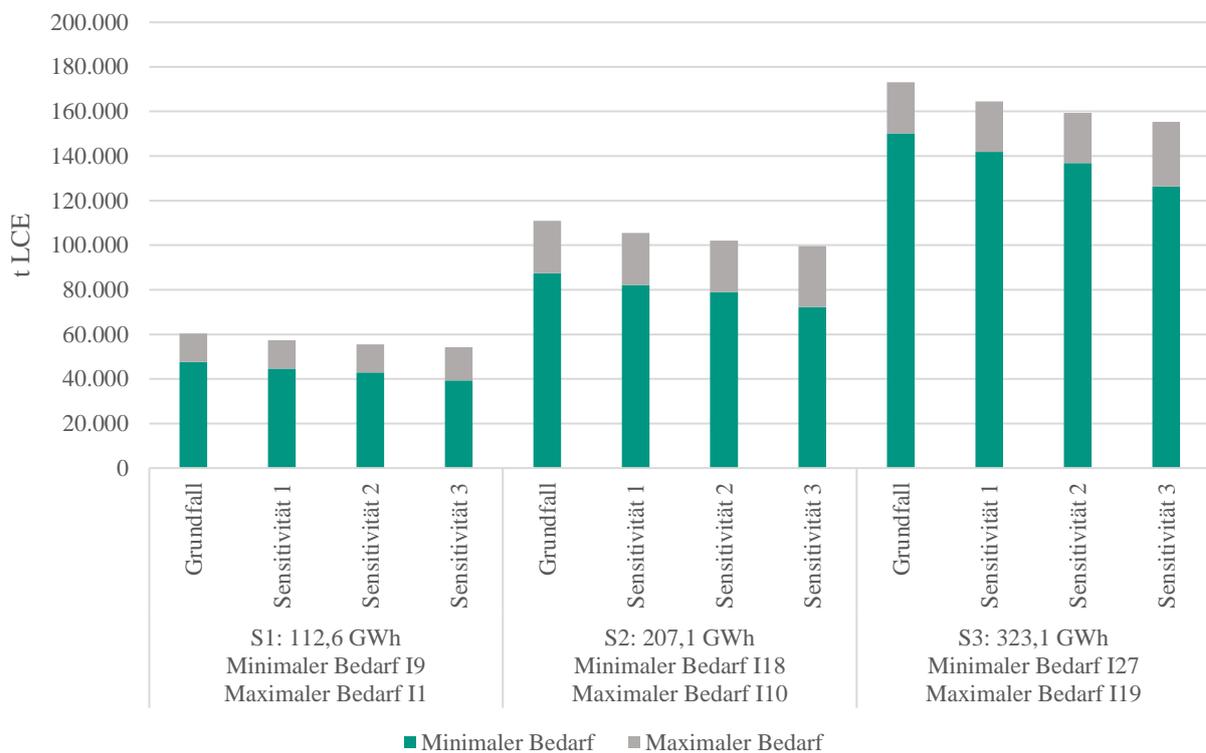
In der dritten Sensitivitätsberechnung wird zusätzlich zur Effizienzsteigerung mit einer Reduktion von 8 % im Lithiumverbrauch die Annahme getroffen, dass die EOL-RR sich erhöht und dadurch auch die EOL-RIR. Die Annahme, dass kein europäisches Sekundärlithium zur Verfügung stehen wird, wird ausgeschlossen. Stattdessen wird für  $R_1$  die Sekundärlithiumrate von 2,5 % (zuvor  $R_2$ , mit einer CR von 70 % und einer EOL-RR von 25 %) angenommen und für  $R_2$  4,0 % (zuvor  $R_3$ , mit einer CR von 70 % und einer EOL-RR von 70 %). Als  $R_3$  wird nun die Angabe der DERA für den maximalen Beitrag an Sekundärlithium für die Batteriezellenproduktion in Europa von 10,6 % (EOL-RIR), bei einer CR von 70 % und einer EOL-RR von 75 %, herangezogen (vgl. Schmidt, 2022) (Tab. 3.24).

**Tabelle 3.24:** Recyclingszenarien der Sensitivitätsanalyse.

Recycling-szenario	Batteriezellen-produktionskapazitäten	EOL-RIR	Erläuterung
$R_1$	S <sub>1</sub>	2,5 %	Die europaweite CR beträgt 70 %. Bei einer EOL-RR von 25 % beträgt die EOL-RIR 2,5 % (Schmidt, 2022).
	S <sub>2</sub>		
	S <sub>3</sub>		
$R_2$	S <sub>1</sub>	4,0 %	Die europaweite CR beträgt 70 %. Bei einer EOL-RR von 70 % beträgt die EOL-RIR 4,0 % (vgl. EU-Kommission, 2020).
	S <sub>2</sub>		
	S <sub>3</sub>		
$R_3$	S <sub>1</sub>	10,6 %	Die europaweite CR beträgt 70 %. Bei einer EOL-RR von 75 % beträgt die EOL-RIR 10,6 % (Schmidt, 2022).
	S <sub>2</sub>		
	S <sub>3</sub>		

## Grundfall

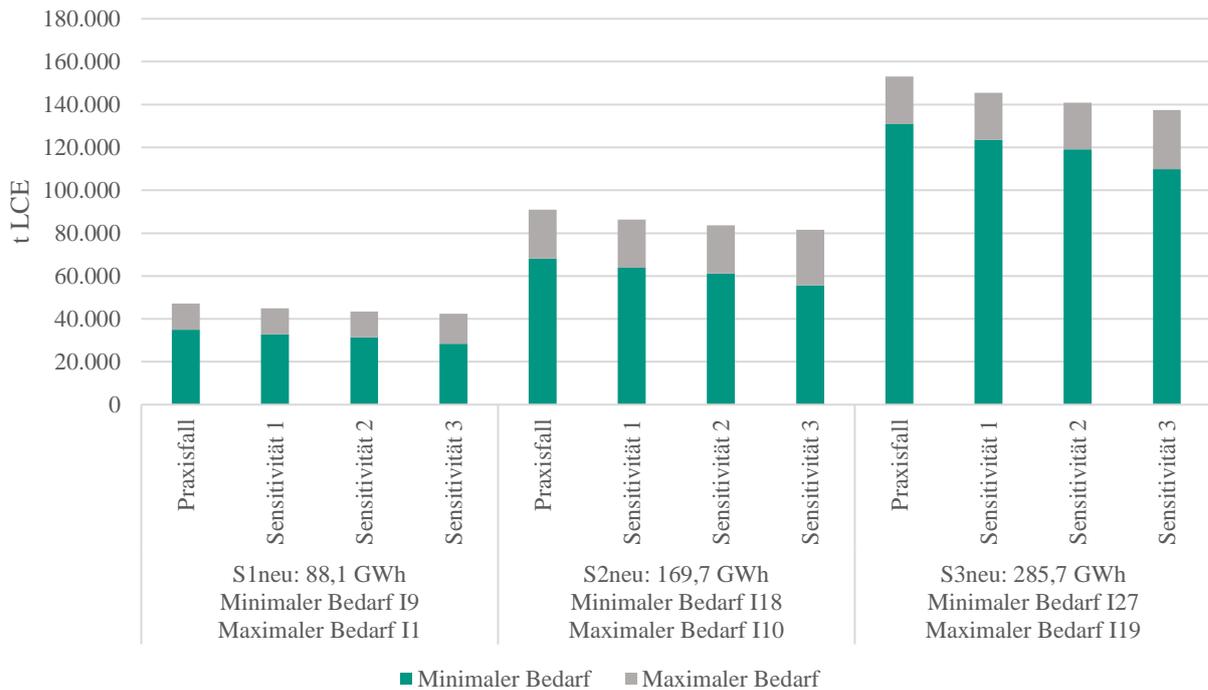
Bei einer Effizienzsteigerung mit einer Reduktion von 8 % des Lithiumverbrauchs für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030, gleichbleibendem Angebot an europäischem Primärlithium und Erhöhung des Sekundärlithiumangebots (Sensitivität 3) verringert sich die Lithiummenge, die am außereuropäischen Markt im Grundfall nachgefragt werden muss, zwischen 9,4 % (in I<sub>2</sub> und I<sub>20</sub>) und maximal 17,5 % (in I<sub>9</sub> und I<sub>18</sub>). Die minimale Menge, die am außereuropäischen Markt nachgefragt werden muss, beläuft sich in I<sub>9</sub> auf 39.253 t LCE statt 47.554 t LCE und maximal in I<sub>19</sub> auf 155.336 t LCE statt 173.173 t LCE im Grundfall (Abb. 3.13). Die Eigenversorgungsquote kann von maximal 21,2 % um 8,1 %-Punkte auf 29,3 % in I<sub>9</sub> erhöht werden.



**Abbildung 3.13:** Reduzierte Lithiumbedarfsmenge am außereuropäischen Markt in den Szenarien des minimalen (I<sub>9</sub>, I<sub>18</sub>, I<sub>27</sub>) und maximalen Bedarfs (I<sub>1</sub>, I<sub>10</sub>, I<sub>19</sub>) für den Grundfall, Sensitivität 1, 2 und 3 im Vergleich. (Szenarienaufstellung Sensitivität 3 in Anhang 7.13, Tab. 7.11).

## Praxisfall

Bei einer Effizienzsteigerung mit einer Reduktion von 8 % des Lithiumverbrauchs für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030, gleichbleibendem Angebot an europäischem Primärlithium und Erhöhung des Sekundärlithiumangebots (Sensitivität 3) verringert sich die Lithiummenge, die am außereuropäischen Markt im Praxisfall nachgefragt werden muss, zwischen 9,4 % (in I<sub>2</sub> und I<sub>20</sub>) und maximal 18,6 % (in I<sub>9</sub>). Die minimale Menge, die am außereuropäischen Markt nachgefragt werden muss, beläuft sich in I<sub>9</sub> auf 28.457 t LCE statt 47.554 t LCE und maximal in I<sub>19</sub> auf 137.348 t LCE statt 173.173 t LCE im Grundfall (Abb. 3.14). Die Eigenversorgungsquote kann von maximal 21,2 % um 8,5 %-Punkte auf 34,5 % in I<sub>9</sub> erhöht werden.



**Abbildung 3.14:** Reduzierte Lithiumbedarfsmenge am außereuropäischen Markt in den Szenarien des minimalen (I9, I18, I27) und maximalen Bedarfs (I1, I10, I19) für den Praxisfall, Sensitivität 1, 2 und 3 im Vergleich. (Szenarienaufstellung Sensitivität 3 in Anhang 7.14, Tab. 7.12).

### Kostenreduktionen im Grund- und Praxisfall

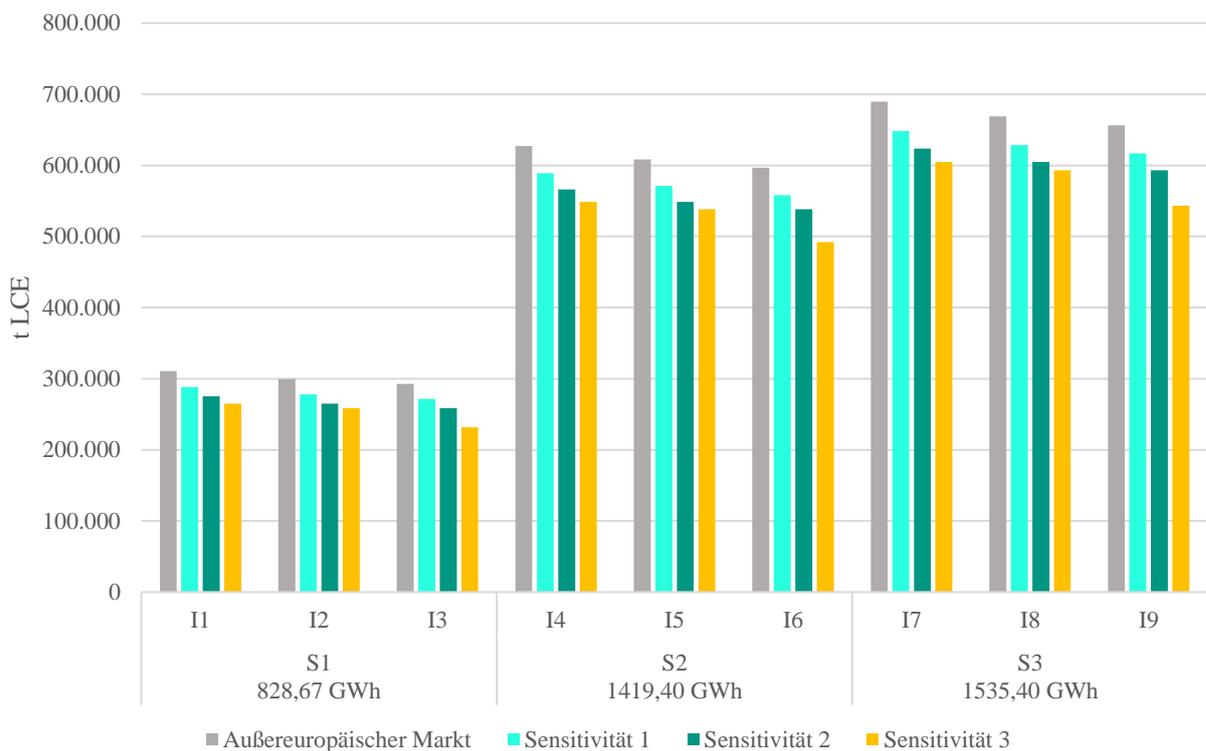
Durch eine Reduktion des Lithiumverbrauchs um 8 % und einer Erhöhung der EOL-RIR auf 10,6 % können die Kosten der Beschaffung am außereuropäischen Markt reduziert werden. Im Grundfall können die geringsten Kosten von 1.183 Mio. EUR auf 976 Mio. EUR (I9, K1), die höchsten Kosten von 11.482 Mio. EUR auf 10.300 Mio. EUR reduziert werden (Tab. 3.25).

**Tabelle 3.25:** Kostenaufstellung im Grund- und Praxisfall jeweils im Vergleich mit der dritten Sensitivität des minimalen (I9, I18, I10) und maximalen Bedarfs (I1, I10, I19).

Mio. US\$		S1 bzw. S1neu		S2 bzw. S2 neu		S3 bzw. S3 neu	
		I9	I1	I18	I10	I27	I19
K1	Grundfall	1.183	1.502	2.175	2.761	3.735	4.308
	Grundfall Sensitivität 3	976	1.347	1.796	2.477	3.143	3.864
	Praxisfall	869	1.175	1.697	2.262	3.256	3.809
	Praxisfall Sensitivität 3	708	1.054	1.385	2.029	2.733	3.417
K2	Grundfall	2.443	3.101	4.493	5.703	7.714	8.897
	Grundfall Sensitivität 3	2.017	2.782	3.708	5.115	6.491	7.980
	Praxisfall	1.796	2.427	3.504	4.672	6.725	7.866
	Praxisfall Sensitivität 3	1.462	2.177	2.861	4.191	5.643	7.056
K3	Grundfall	3.153	4.002	5.798	7.360	9.956	11.482
	Grundfall Sensitivität 3	2.603	3.590	4.786	6.602	8.377	10.300
	Praxisfall	2.318	3.132	4.522	6.030	8.680	10.153
	Praxisfall Sensitivität 3	1.887	2.809	3.693	5.409	7.283	9.107

## Europa

Bei einer Reduktion von 8 % des Lithiumverbrauchs für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030, gleichbleibendem Angebot an europäischem Primärlithium und Erhöhung des Sekundärlithiumangebots (Sensitivität 3) verringert sich die Lithiummenge, die am außereuropäischen Markt nachgefragt werden muss, zwischen 11,3 % (in I<sub>8</sub>) und maximal 20,9 % (in I<sub>3</sub>). Die minimale Menge, die am außereuropäischen Markt nachgefragt werden muss, liegt bei 231.733t LCE statt 292.812 t LCE in I<sub>3</sub> und die maximale bei 604.604t LCE statt 689.366t LCE in I<sub>7</sub> (Abb. 3.15). Die Eigenversorgungsquote kann von maximal 34,1 % um 9,2 %-Punkte auf 43,3 % in I<sub>3</sub> erhöht werden.



**Abbildung 3.15:** Durch Effizienzsteigerung mit einer Reduktion des Lithiumverbrauchs (-8 %) und Erhöhung des Sekundärlithiums reduzierte Lithiumbedarfsmenge am außereuropäischen Markt für Europa, im Vergleich die Grundannahme und die Sensitivitäten 1-3 (Anhang 7.16, Tab. 7.14).

## 3.6 Diskussion

### 3.6.1 Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030

Die deutsche Batteriezellenproduktion für das Jahr 2030 wird auf 80 GWh–270 GWh prognostiziert (DERA, 2021b). Das BMWi (neue Legislaturperiode: BMWK) geht von einer sich etablierenden inländischen Batteriezellenproduktionskapazität von mehr als 180 GWh aus (BMW, 2021a). In der vorliegenden Studie wurde die Batteriezellenproduktionskapazität in Deutschland im Jahr 2030 mittels Recherchen mit 112,6 GWh ( $S_1$ ), 207,1 GWh ( $S_2$ ) und 323,1 GWh ( $S_3$ ) kalkuliert. Der Unterschied kann in der Einbeziehung von drei Batteriezellenproduktionsstandorten begründet werden, welche noch nicht durch die jeweiligen Unternehmen genau spezifiziert wurden (Tab. 3.3). Außerdem stellt sich bei der Recherche zu den Kapazitäten der Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa für die kommenden Jahre bis 2030 heraus, dass eine genaue Marktabbildung kontinuierlich angepasst werden muss, da sich Kapazitäts- und Technologieangaben wie auch die beteiligten Produzenten fortwährend ändern. Ein Beispiel ist der Widerruf der angekündigten Batteriezellenproduktionsstätte in Bitterfeld-Wolfen von Farasis, einem Produzenten mit Hauptsitz in China (dpa, 2022). Es verbleiben damit drei Produzenten bzw. 17,3 % der Gesamtbatteriezellenproduktionskapazität 2030 in Deutschland unter direkter chinesischer Führung. Laut Fraunhofer ISI sind etwa die Hälfte der geplanten europäischen Batteriezellenproduktionen (250 GWh–300 GWh) von asiatischen Produzenten geplant (Stand 2020; Thielmann et al., 2020). Die Recherche für die vorliegende Studie ergibt, dass elf Produktionsstandorte in Europa direkt von asiatischen Produzenten errichtet werden, was im Mindest-Szenario ca. 193 GWh (ca. 23 %) und im Maximal-Szenario ca. 347 GWh (ca. 23 %) sind (Stand Juli 2022, Anhang 7.3, Tab. 7.2). Da bislang weder eine etablierte Elektrodenproduktion noch eine Batteriezellenproduktion in Europa existieren und bis 2025 lediglich 4 % der weltweit nachgefragten Kathoden und 2 % der Anoden in Europa produziert werden sollen (IEA, 2022), sind Verträge mit Produzenten aus Asien weiterhin unerlässlich für den wachsenden europäischen E-Fahrzeugabsatzmarkt. Neben LG Chemicals und Samsung (Südkorea) haben große deutsche und europäische Autobauer auch mit CATL aus China Langzeitlieferverträge für Batteriezellen geschlossen (Bridge und Faigen, 2022).

Europa und Deutschland wollen ihren Marktanteil zumindest an der globalen Batteriezellenproduktion bis zum Jahr 2030 auf 30 % erhöhen und gleichzeitig eine geschlossene Wertschöpfungskette etablieren, die von der Förderung der Rohstoffe bis hin zum Recycling reicht (cradle to cradle) (BMW, 2021a). Unterstützt werden Unternehmen und Forschung durch Fördergelder wie beispielsweise im Rahmen der IPCEI-Förderprogramme (Important Projects of Common European Interest), auch europäische Allianzen wie die EBA (European Battery Alliance) oder ERMA (European Raw Material Alliance) sollen eine Plattform für den Austausch und die strategische Zusammenarbeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette sein, um Deutschland und Europa wettbewerbsfähig und autarker für den Batterie-Weltmarkt aufzustellen. Dies legte die EU-Kommission u. a. in der Aktualisierung ihrer Industriestrategie und im Aktionsplan für kritische Rohstoffe fest (EU-Kommission, 2020b, 2020a). Auch das EIT (European Institute of Innovation Technology) mit seiner Unterorganisation RawMaterials, welche die ERMA koordiniert und aus

dem Förderprogramm Horizon Europe entstanden ist, hat u. a. zum Ziel, die Konkurrenzfähigkeit Europas in Bezug auf Rohstoffsicherung interdisziplinär und intereuropäisch zu stärken.

Für die Umsetzung der Verkehrswende, welche dazu beitragen soll, dass die Klimaziele des EU Green Deal erreichbar werden, sowie dem Ziel der aktuellen Bundesregierung im Jahr 2030 „15 Mio. vollelektrische PKWs“ in Deutschland zugelassen zu haben, sind LIBs für den Ausbau eines elektrischen Fuhrparks der EU-27 aus heutiger Sicht essenziell. Um sich unabhängiger vom derzeitigen asiatischen Anbietermarkt machen zu können, bedarf es dem Auf- und Ausbau der Batteriezellenproduktionskapazitäten sowie der nach- wie auch vorgelagerten Industrien.

### 3.6.2 Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa im Jahr 2030

Die vorliegende Studie sagt einen Bedarf an Lithiumchemikalien für die Batteriezellenproduktion im Jahr 2030 in Deutschland in Höhe von ca. 60,4 kt LCE in S<sub>1</sub>, 111,0 kt LCE in S<sub>2</sub> und 173,2 t LCE in S<sub>3</sub><sup>13</sup> voraus. Damit liegt der Bedarf zwischen ca. 11,3 % und 32,5 % der globalen Lithiumproduktion aus dem Jahr 2021 (ca. 532,3 kt LCE, USGS, 2022). Der aktuelle Bedarf für die bereits bestehende Batteriezellenproduktion des Unternehmens Akasol in Darmstadt liegt bei 0,5 % der globalen Lithiumproduktion (Batteriezellenproduktionskapazität: 5 GWh, Lithiumbedarf: 2,7 kt LCE). Zieht man die Aktualisierung der Lithium-Studie der DERA heran (Schmidt, 2022), entsprechen die in der vorliegenden Studie kalkulierten notwendigen Lithiummengen für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 zwischen ca. 15,6 % und 44,9 % der prognostizierten benötigten Lithiummengen für die E-Mobilität 2030 in Europa (386 kt LCE; Schmidt, 2022).

Der berechnete europäische Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion liegt in der vorliegenden Studie bereits im Mindest-Szenario S<sub>1</sub> (ca. 444,1 kt LCE) ca. 58,2 kt LCE über den Bedarfsangaben für Europa der DERA für BEV (ca. 385,9 kt LCE, Schmidt, 2022) und 144,1 kt LCE über den Werten (max. 300 kt LCE) von Gregoir und van Acker (2022). Die Unterschiede können mit einer unterschiedlichen Datengrundlage begründet werden. Nach Angaben der DERA (pers. Kom. vom 28.07.2022) wurden für die Aktualisierung der Lithiumstudie nicht die Angaben zur Lithiummenge in den Kathodentechnologien aus dem Bericht „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ (Marscheider-Weidemann et al., 2021), der in der vorliegenden Studie herangezogen wurde, verwendet, sondern neuere, noch nicht veröffentlichte Zahlen. Hinzu kommt, dass es weder für die globale noch europäische oder deutsche Batteriezellenproduktion eine allgemeingültige Datenbank gibt. Die Kapazitätsangaben beruhen auf eigenen Recherchen, die durch die Dynamik des Marktes je nach Zeitpunkt der Datenerhebung abweichen können. Schmidt (2022) nimmt für seine Szenarien eine Kapazität von 1.000 GWh an. Die Studie von Gregoir und van Acker (2022) nimmt eine durchschnittliche Batteriekapazität von 60 kWh an, sodass 3 bis 7 Mio. elektrische Fahrzeuge (300–420 GWh) im Jahr 2030 in Europa produziert werden könnten. Folglich liegt die Batteriezellenproduktionskapazität unterhalb der für die vorliegende Studie angenommenen für Europa (828,67–1535,4 GWh). Die Studie von Gregoir und van Acker (2022)

---

<sup>13</sup> Für den Praxisfall ergab sich durch Abzug der bereits abgesicherten Mengen von VW und Stellantis ein geringerer Bedarf. Jedoch soll in diesem Abschnitt ausschließlich der absolute Bedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland diskutiert werden.

gibt keine Auskunft darüber, wie hoch die Lithiummenge in den Kathoden für die Berechnung ist. Folglich kann keine Aussage über die Abweichung zu den Lithiummengenangaben, die in der vorliegenden Studie verwendet wurden, getätigt werden und auch keine Einschätzung gegeben werden, wenn eine Abweichung bestünde, welche mehr dem neusten Stand der Technik entspricht. Es kann vermutet werden, da die Mengenangaben zu Lithium (und den anderen notwendigen Batteriemetallen) allgemein nicht einfach frei zugänglich sind, um wirtschaftliche, vor allem wettbewerbsbedingte Interessen der Industrie zu wahren, dass berechnete Lithiumbedarfe vielmehr eine Größenordnung als eine exakte Angabe darstellen.

Wie in der Sensitivitätsanalyse gezeigt, könnte der Lithiumverbrauch in den Kathoden durch weitere Fortschritte in der Elektroden- und Batterieforschung in den kommenden Jahren nochmals gesenkt werden, allerdings sieht beispielsweise die IEA trotz technologischer Innovationen einen steigenden Verbrauch, da die angestrebte längere Reichweite von BEV eine höhere Batteriekapazität verlangt (IEA, 2022). Der Materialeinsatz und -verbrauch in Elektroden hängt u. a. von den gewünschten Eigenschaften der Kathoden ab. So sind neben der Energiedichte auch die elektrochemische und thermische Stabilität, die Leitfähigkeit und die Kosten für die Materialien entscheidend (Li et al., 2017).

Globale Betrachtungen (OECD, 2019; Hund et al., 2020; IEA, 2021a; Marscheider-Weidemann et al., 2021) wie auch Berechnungen für den europäischen Raum (Miedema und Moll, 2013; Bobba et al., 2020; Gregoir und van Acker, 2022) prognostizieren eine stark ansteigende Nachfrage nach Rohstoffen für Technologien der Energie- und Mobilitätswende wie auch der Digitalisierung (vgl. Öko-Institut, 2017). Besonders der Bedarf an Lithium wird durch den Wechsel vom Verbrennungsmotor zum BEV angetrieben. Auch wenn es Forschungsfortschritte bei den Alternativen zur LIB gibt, wird es bis 2030 vermutlich nur wenige vergleichbare Batterietechnologien mit kommerzieller Marktreife, wie die von CATL im Jahr 2021 auf den Markt gebrachte Natrium-Ionen-Batterie, geben, welche die Nachfrage nach Lithium zusätzlich schmälern könnten (IEA, 2022).

### **3.6.3 Lithiumangebot in Europa**

#### **3.6.3.1 Primärlithium**

Die sieben Lithiumförderprojekte im fortgeschrittenen Projektstadium könnten bei rechtzeitiger Umsetzung ab 2026 ca. 133,6 kt LCE (in Form von Spodumenkonzentrat, Lithiumhydroxid Monohydrat, Lithiumkarbonat und Lithiumfluorid) in der EU-27 produzieren. Sollte das Anfang 2022 gestoppte Projekt im Jadar Becken, Serbien, wieder aufgenommen werden, könnte die europäische Lithiumproduktion bei ca. 180 kt LCE liegen. In der Studie „Metals for Clean Energy“ geben Gregoir und van Acker (2022) ebenfalls eine mögliche heimische Primärlithiummenge von ca. 130 kt LCE an. Miteinbezogen werden dabei ebenfalls die Projekte aus Deutschland, Tschechien, Finnland, Portugal, Österreich und auch aus Serbien.

Die Realisation von Rohstoffprojekten ist aus wirtschaftlicher Sicht wahrscheinlicher, wenn die Rohstoffmarktpreise die Projektkosten (OPEX, CAPEX) übersteigen (Sterba et al., 2019). Im Jahr 2022 hat Lithium, vornehmlich aufgrund des Russland-Ukraine-Kriegs, einen preislichen

Aufschwung erfahren und stieg im April 2022 auf über 80.000 US\$/t für Lithiumhydroxid Monohydrat (Preis für Lithiumhydroxid Monohydrat im Januar 2022: 33.000 US\$/t, im November 2022: 77.000 US\$/t; VER, 2022d; Argus Media Group, 2022b). Damit liegt der Preis für Lithiumhydroxid Monohydrat seit Ende 2021 (November 2021: über 27.000 US\$/t; USGS, 2022) über den Preisannahmen der in der vorliegenden Studie beschriebenen Projekte aus der EU-27 (höchste Preisannahme: 18.350 US\$/t für Lithiumhydroxid Monohydrat aus Wolfsberg, European Lithium Ltd., 2021, 2021a). Derzeit wird der Preis für Lithiumhydroxid Monohydrat für das Jahr 2023 mit 56.000 US\$/t prognostiziert, was alle Projekte mit ihren ursprünglichen Preisannahmen als wirtschaftlich erachten lässt (Goldinvest, 2022). Wegen der gestiegenen Energiepreise in Europa könnten die Projektbetreiber allerdings neue Annahmen treffen müssen, welche sich den Prognosen für die Lithiumhydroxid Monohydratpreise stärker annähern (vgl. DIHK, 2022; DESTATIS, 2022; ewi, 2022). Drei der hier in Betracht gezogenen Projekte zur Lithiumgewinnung in der EU-27 würden unterhalb eines Marktpreises für Lithiumhydroxid Monohydrat von bisher ca. 17.000 US\$/t im Jahr 2025 nicht realisiert werden können (Cinovec 17.000 US\$/t, Wolfsberg 18.350 US\$/t, San José 17.000 US\$/t; European Metals Holding Ltd., 2022; European Lithium Ltd., 2021; Infinity Lithium, 2021). Dies hätte zur Folge, dass das Primärlithiumangebot der EU-27, sollten keine weiteren Projekte etabliert und realisiert werden, sich um 35 % auf ca. 87 kt LCE verringert. Die Preisbildung hängt grundsätzlich von der Nachfrage- und Angebotssituation ab, ist die Nachfrage höher als das Angebot, steigt der Preis und umgekehrt (vgl. Kap. 3.5.4.3; Gale, 1955). Die Hauptanwendung von Lithium liegt seit 2015 in Batterietechnologien, die Nachfrage dafür steigt seither kontinuierlich (vgl. Kap. 3.3.1) (USGS, 2016–2022; Hund et al., 2020). Da verschiedene Quellen davon ausgehen, dass im Jahr 2030 eher ein Lithium-Angebotsdefizit vorliegen wird (Schmidt, 2022; Gregoir und van Acker, 2022), ist anzunehmen, dass der Preis für Lithium von den Anbietern vorgegeben werden kann und somit höhere Kosten für Energie, Logistik oder Exploration an den Kunden weitergegeben werden können. Damit sollten nicht nur die Break-Even-Preise<sup>14</sup> der Projekte in Zukunft überstiegen werden, sondern gewinnbringende Preise für die Projektbetreiber erzielt werden. Sollten die geologischen und technischen Bedingungen die Förderung nicht verhindern, erscheint die Fortführung der Lithiumprojekte in den EU-27 aus betriebswirtschaftlicher Sicht als ausführbar.

Neben ökonomischen Gründen ist ein weiterer Grund, der Bergbauprojekte verhindern kann, die mangelnde Akzeptanz der Bevölkerung, die auch in Deutschland zunimmt (Nippa, 2015; Weber et al., 2018; Steiger et al., 2022). Ob bei der Lithiumgewinnung aus Festgestein oder aus Geothermalwasser, lokale Bürgerinitiativen und überregionale Interessengruppen leisten Widerstand gegen die Vorhaben. Schon seit Projektbeginn steht das Unternehmen Savannah Resources, welches im Norden von Portugal in der Mina do Barroso Lithium abbauen möchte, in der Kritik, weil schwere Schäden an der Umwelt und ein negativer Wandel in der Region befürchtet werden (Faget, 2021). Nun hat im Juli 2022 eine lokale Gemeindegruppe Klage gegen das Unternehmen Savannah Resources eingereicht, sie werfen ihm unrechte Landkäufe vor (Demony, 2022). Auch in Spanien schließen sich lokale Interessengruppen zusammen und protestieren gemeinsam mit internationalen Unterstützern (Netzwerk „Sí a la vida y no a la minería“) gegen den Abbau von Lithium in Cáceres, Extremadura von Infinity Lithium (Netzwerk Yes to Life, No to Mining, 2020). Monatelange Proteste, in denen Tausende Demonstranten in Belgrad und anderen

<sup>14</sup> Break-Even-Preis: Der Preis, an dem die Einnahmen die Kosten decken, allerdings noch keinen Gewinn erwirtschaften (Vgl. Cebesoy, 1997).

serbischen Städten gegen das Jadar-Projekt von Rio Tinto, in der Nähe von Loznica, Jadar, Serbien, auf die Straßen gingen, resultierten darin, dass die serbische Regierung die bereits erteilten Genehmigungen zurückzog (De Launey, 2022). Auch im Oberrheingraben, Deutschland, stößt die Vulcan Energie Ressourcen GmbH auf Vorbehalte bei ihren Explorationsanträgen. Während des Jahres 2021 stimmten die Verantwortlichen in diversen Gemeinden in der Ortenau gegen 3-D-seismische Erkundungen des Unternehmens sowie gegen Verlängerung der Genehmigung der Förderung von Erdwärme, Soleförderung und Lithiumgewinnung zu gewerblichen Zwecken. Die Entscheidungen gegen die Vorhaben wurden damit begründet, dass Bedenken bezüglich unvorhersehbarer Umweltauswirkungen bestünden (Moos, 2021; von Gangl, 2021; Meier, 2021). Die Akzeptanz in der Bevölkerung muss durch eine sachlich-neutrale Aufklärung der vielschichtigen Zusammenhänge von Bergbau, Bergbautechnologie und moderner Umweltschutzstandards im Bergbau erreicht werden (vgl. Cousse et al., 2021). Der öffentliche Zuspruch kann durch das Verständnis der Notwendigkeit des Bergbaus zur Gewinnung von Rohstoffen für Technologien und Produkte für die Energie- und Verkehrswende erhöht werden. Auch das Herausheben und Erläutern umweltfreundlicher Vorteile, wie beispielsweise die Reduktion des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks durch gleichzeitige Strom- und Wärmeproduktion (vgl. Grant et al., 2020) bei der Lithiumgewinnung aus Geothermalwasser im Vergleich zur Förderung aus Festgestein oder Solen, kann dazu beitragen, die Ablehnung in der Bevölkerung zu mindern.

Die Entwicklung und Inbetriebnahme von Projekten zur Lithiumgewinnung in Deutschland und Europa kann dazu beitragen, die inländische und europäische stetig wachsende Nachfrage mit decken zu können. Bis heimische Projekte Lithium auf dem Markt anbieten können, haben die Projektentwickler verschiedene Herausforderungen zu bewältigen. Für die Realisation von Explorationsprojekten sind neben technisch-wirtschaftlichen auch genehmigungsrechtliche Faktoren entscheidend (Steiger et al., 2022). Zu geringe Erzgehalte oder Tonnagen, Lieferengpässe der Ausrüstung, verfehlte Preisannahmen der Abbaukosten und der Absatzpreise, Widerstand der Bevölkerung oder Ungewissheiten in der Finanzierung können Projektvorhaben vorzeitig beenden oder zumindest verzögern. Wie das europäische Primärlithium innerhalb von Europa eingesetzt wird, ist aufgrund der noch nicht ausreichenden Infrastruktur zwischen Mine und Batteriezelle sowie aufgrund von vertraglichen Vereinbarungen der Lithiumproduzenten noch offen. Die genannten Sachlagen können dazu führen, dass das heimische (europäische) Primärlithium nicht in Deutschland weiterverarbeitet wird und stattdessen zur Weiterverarbeitung den Kontinent verlässt, um später als Lithiumchemikalie, verarbeitet in einer Kathode, wieder importiert oder global andernorts verarbeitet zu werden. Daher ist es für Europa und Deutschland essenziell, ebenso die Infrastruktur der Raffination und der Elektrodenproduktion aufzubauen.

### **3.6.3.2 Recycling von LIBs, Sekundärlithium**

Neben dem heimischen Abbau ist das Recycling die zweite Säule, durch die Deutschland seine Lithiumnachfrage decken und die EU-Quotenvorgaben einhalten möchte. Stand Ende 2021 befinden sich zwei Drittel der derzeitigen LIB-Recyclingkapazitäten (ca. 207,5 kt) in China, Japan und Korea (Baum et al., 2022). Europa liegt im globalen Vergleich mit ca. 92 kt Recyclingkapazitäten hinter dem ostasiatischen Raum, die Anlagen befinden sich in Belgien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Norwegen, der Schweiz und dem Vereinten Königreich (Mohr et al., 2020; Baum et al., 2022). Es sind weltweit neue LIB-Recyclingkapazitäten geplant,

einschließlich dieser werden Ostasien (ca. 219,5 kt) und Europa (ca. 110 kt) die größten Möglichkeiten haben und über 90 % der Kapazitäten (329,5 kt) werden in diesen Regionen angesiedelt sein (Baum et al., 2022). Die BGR und DERA prognostizieren aufgrund von geplanten Erweiterungen und dem Bau von neuen Anlagen eine Recyclingkapazität von max. 380 kt im Jahr 2030 in Europa (Kresse et al., 2022).

Nach einem Vorschlag der EU-Kommission für die Überarbeitung der „Batterie Richtlinie“ (RL 2006/66/EC) sollen ab dem Jahr 2030 die CR und die EOL-RR von LIBs bei je 70 % liegen (2020: EOL-RR < 1 %), die EOL-RIR bei 4 % (2020: 0 %) (EU-Kommission, 2020; IEA, 2021a; Di Persio et al., 2020). Momentan stellen verschiedene Faktoren eine Herausforderung für die Etablierung eines reibungslosen Recyclingprozesses im industriellen Maßstab dar, u. a. die noch geringe Verfügbarkeit von Lithium aus BEV, die komplexe Zellchemie der jeweiligen Batteriezelltypen, welche die technisch mögliche Rückgewinnungsrate bedingt, die Wirtschaftlichkeit (speziell bei der Rückgewinnung von Lithium) und die Umweltbilanz des Recyclingprozesses sowie eine unzureichende Recycling-Infrastruktur (Neumann et al., 2022; Xu et al., 2020; Ziemann et al., 2018; Kresse et al., 2022). Wegen physikochemischer und wirtschaftlicher Gründe liegt der Fokus beim Recycling einer LIB noch auf Nickel oder Kobalt (Stand 2022, Kresse et al., 2022). Die derzeitige durchschnittliche Lebensdauer einer LIB in BEV beträgt acht Jahre (Abdelbaky et al., 2020). Nach 2030, wenn die LIBs der BEV, die heute neu zugelassen werden, ihr EOL-Stadium erreicht haben, und wenn diese in Europa bleiben, kann die CR, wie auch das EOL-Recycling, zunehmen (IEA, 2021a; Schmidt, 2022).

Damit 2030 Sekundärlithium in battery grade-Reinheit für die Produktion von neuen Batteriezellen zur Verfügung steht, müssen heute der Auf- und Ausbau der notwendigen Recyclinginfrastruktur vorangetrieben und innovative Technologien gefördert werden. In Deutschland und Europa werden Recyclingprozesse (vornehmlich hydro- und pyrometallurgisches Recycling) sowie der Aufbau einer Recyclinginfrastruktur erforscht und durch Initiativen, wie beispielsweise die europäische „Battery 2030+ Initiative“, gefördert (Fichtner et al., 2021).

### 3.6.4 Lithiumbedarfsdeckung am außereuropäischen Markt

Die Eigenversorgung durch Primär- und Sekundärlithium aus der EU-27 kann zwischen 0 % und maximal 21,2 % im Grundfall sowie maximal 26,0 % im Praxisfall (je in  $S_1$ ) liegen. Mit der höchst angenommenen Batteriezellenproduktionskapazität ( $S_3$ ) wird die Eigenversorgungsquote im Grundfall nur bei maximal 13,3 % und im Praxisfall bei maximal 14,5 % liegen. Eine Reduzierung des Lithiumverbrauchs in der Kathode kombiniert mit einer Erhöhung der EOL-RIR auf 10,6 % (Sensitivität 3) kann den Anteil der Eigenversorgung im Grundfall auf maximal 29,3 % in  $S_1$  und 20,7 % in  $S_3$  sowie im Praxisfall auf maximal 34,5 % in  $S_1$  und 22,0 % in  $S_3$  steigern. Auf europäischer Ebene liegt die Eigenversorgungsquote zwischen 16,2 % ( $S_3$ ) und 34,1 % ( $S_1$ ), gerechnet mit den Annahmen der Sensitivität 3 zwischen 20,1 % und 43,3 %. Laut DERA liegt die Möglichkeit der Eigenversorgung Europas mit Lithium für alle Anwendungen zwischen 27 % und 34 %, damit sieht die DERA eine Importabhängigkeit für Europa im Jahr 2030 (Schmidt, 2022), welche sich durch die Erkenntnisse der vorliegenden Studie auch für Deutschland bestätigen lässt. Die Unterschiede der prozentualen Anteile gehen aus den verschiedenen zugrundeliegenden Parametern hervor (vgl. Kap. 3.6.2).

Das bei der Gründung der ERMA benannte Ziel des EU-Kommissars, Herr Thierry Breton, für den Binnenmarkt, dass „Europa bis 2025 [in Bezug auf] Lithium annähernd autark“ sein wird (EU-Kommission 2020c), wird unter den gegebenen globalen Nachfrage- und Angebotsbedingungen nicht zu erreichen sein. China war im Jahr 2021 mit 14 kt Lithiumproduktion der drittgrößte Produzent (13,4 %) von Lithium weltweit, 76 % der Batteriezellen und Batterien, 70 % der Kathoden und 85 % der Anoden werden dort gefertigt, ca. 58 % des derzeitigen LIB-Recyclings findet in China statt (USGS, 2022; Bridge und Faigen, 2022; IEA, 2022; Baum et al., 2022). Im November 2022 führte China zum dritten Mal in Folge die Liste des globalen LIB-Wertschöpfungskettenrankings von Bloomberg an, Deutschland ist auf Platz sechs von 30 gelistet (BNEF, 2022). Eins von fünf ausschlaggebenden Bewertungskriterien ist die Verfügbarkeit von heimischen Primärressourcen für LIBs, welches für Deutschland kritisch ausfiel, jedoch bei einem noch geringen Bedarf für die existierende Batteriezellenproduktion zu einer Platzierung im oberen Viertel führte (BNEF, 2022).

Die heimischen Primär- und Sekundärressourcen werden den Bedarf nicht decken können und die Industrie für die weiteren Verarbeitungsschritte wird nicht im ausreichenden Maße existent sein. Die Produzenten von Batteriezellen in Deutschland und Europa, die fertige Kathoden von Zulieferern beziehen, verlagern die Herausforderung der Rohstoffbeschaffung eine Stufe weiter nach vorne in der Wertschöpfungskette ins Ausland, vornehmlich nach China, Südkorea und Japan, wo laut IEA auch in den kommenden Jahren hauptsächlich die Kathodenproduktion stattfinden wird.

### 3.7 Schlussfolgerung

Mit dem Verbot von Neuzulassungen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ab 2035 möchte die EU einen Beitrag zur Erreichung der globalen Emissionsreduktionsziele leisten. Für den Ausbau eines elektrischen Fuhrparks in der EU sind nach heutigem Stand LIBs essenziell. Stand 2022 liegt die Wertschöpfungskette einer LIB allerdings hauptsächlich in China. China hat den Ausbau der Industrie von „new energy vehicles“ sowie einer Batteriekreislaufwirtschaft und das besondere Management der LIB-Industrie in ihrem Fünfjahresplan festgehalten und steht damit als heutiger globaler Marktführer entlang der gesamten Wertschöpfungskette gut vorbereitet gegenüber den Vorhaben der EU und Deutschlands zum Auf- und Ausbau einer autarken E-Mobilitätsindustrie.

Auch im Jahr 2030 wird der Lithiumbedarf für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa überwiegend vom außereuropäischen Markt gedeckt werden müssen. Je nach Szenario und Fall bedarf es nach den Kalkulationen der vorliegenden Studie für die Batteriezellenproduktion in Deutschland zwischen 65,5 % und 100 % des Lithiums vom außereuropäischen Markt und zwischen 56,7 % und 83,8 % für Europa. Zu den sieben Projekten der Lithiumgewinnung im fortgeschrittenen Stadium in der EU-27 können weitere, bereits angefangene oder noch nicht aufgegriffene Lithiumförderprojekte kommen, die die Eigenversorgungsquote erhöhen können. Der Ausbau des heimischen europäischen Bergbaus und der Kreislaufwirtschaft, unter Einbehaltung der notwendigen sozialen und Umweltschutzstandards, könnte dazu beitragen, die Abhängigkeit vom außereuropäischen Lithiummarkt zu verringern und einen Beitrag zur Rohstoffversorgung in Deutschland zu leisten. Auch könnten damit die globalen (Übereinkommen von Paris), europäischen (EU Green Deal) und nationalen Klimaschutzziele (z. B. Bundes-Klimaschutzgesetz) eingehalten werden, während die Nachhaltigkeitsziele der UN erreicht werden. Wenn die Industrien von Bergbau, Raffination und Recycling in der EU nicht aus- und aufgebaut werden, wird die Abhängigkeit vom asiatischen Markt in einem hohen Maß über das Jahr 2030 hinaus bestehen bleiben.

Der Preisanstieg bei metallischen Rohstoffen kann auf der einen Seite europäische Bergbauprojekte durch einen hohen Lithiumpreis rentabel machen, auf der anderen Seite werden steigende Kosten für Energie die Betriebskosten der verschiedenen Industrien entlang der Wertschöpfungskette erhöhen und eine Herausforderung für den Geschäftsaufbau oder die Weiterführung darstellen, sofern die Kosten nicht an die Kunden weitergegeben werden können. Demnach werden nicht nur übliche wirtschaftliche, technische, administrative und sozio-ökologische Herausforderungen beim Aufbau einer kompletten „cradle to cradle“ BEV-Wertschöpfungskette zu bewältigen sein, sondern Deutschland und die EU müssen sich neuen wirtschaftlichen Bedingungen stellen, welche die bestehende, nicht ausreichende Infrastruktur noch weiter schwächen und ggf. einen Ausbau und folglich die Erreichung der Klimaziele verhindern könnten. Die Erreichung von Klima- und Nachhaltigkeitszielen auf der ganzen Welt hängt von der Verfügbarkeit und Verteilung von Rohstoffen ab. Die Realisation der Batteriezellenproduktion in Deutschland wird nicht nur von der Verfügbarkeit von Lithium abhängen, die der Rohstoffe Kobalt und Graphit ist bereits heute für die EU kritisch, auch hier bestimmt China das Angebot und die Nachfrage.

## **4. Iridium- und Scandiumbedarf für die Erzeugung von Elektrolyse-Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland**

### **4.1 Zusammenfassung**

Der Wirtschaftszweig „Erzeugung und erste Bearbeitung von Eisen und Stahl“ ist der zweitgrößte Emittent der Industrie in Deutschland (Stand 2020). In der Fachwelt werden verschiedene Optionen diskutiert und teilweise in der Industrie bereits erprobt, wie die (Kohlenstoffdioxid-)Emissionen, beispielsweise bei der Stahlherstellung, zu minimieren sind. Der Einsatz von Wasserstoff (H<sub>2</sub>) stellt eine Möglichkeit dar, die Emissionen der Stahlproduktion zu reduzieren.

Wasserstoff kann durch Elektrolyse hergestellt werden. Zur Errichtung eines Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyseurs (PEM) wird u. a. Iridium (Ir), zur Errichtung eines Festoxid-Elektrolyseurs (SO) u. a. Scandium (Sc) benötigt. Im vorliegenden Fallbeispiel werden zwischen 4,2 GW und 5,6 GW an Elektrolysekapazitäten für die Herstellung von Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland (Einsatzbereich 1) berechnet. Wenn die PEM-Elektrolyse (PEMEL) 45 % der Elektrolysekapazität einnimmt, bedarf es der vorliegenden Kalkulation nach zwischen 2,8 % (0,2 t) und 4,3 % (0,3 t) der globalen Iridiumförderung aus dem Jahr 2018 zur Errichtung der notwendigen Anlagen. Wenn die SO-Elektrolyse (SOEL) gleichzeitig 10 % der Elektrolysekapazität einnimmt, wird der Scandiumbedarf sich zwischen 0,2 % (0,02 t) und 0,6 % (0,05 t) der Förderung aus dem gleichen Jahr bewegen. Um den gesamten Wasserstoffbedarf Deutschlands für das Jahr 2030 zu produzieren (Einsatzbereich 3), kann es bei gleicher Marktverteilung und Konfiguration der Elektrolyseurtechnologien zu einem Iridiumbedarf von ca. 59 % der weltweiten Raffinadeproduktion und einem Scandiumbedarf von ca. 9 % der weltweiten Bergwerksförderung aus dem Jahr 2018 kommen.

Wenn sich die Marktaufteilung der Elektrolyseurtechnologien nicht stärker hin zu Alternativen mit einem geringeren kritischen Rohstoffverbrauch entwickelt, wird der Bedarf an Iridium für Deutschland zu Herausforderungen bei der Verfügbarkeit führen. Maßnahmen, wie die Erhöhung der Materialeffizienz, der Ausbau der Recyclingmöglichkeiten und die Sicherung der Lieferketten (z. B. vertikale Integration), sollten daher in Betracht gezogen werden.

## 4.2 Einführung

Bis 2030 sollen die Treibhausgas-(THG-)Emissionen in der EU um 60 % im Vergleich zu 1990 (4,8 Mrd. t CO<sub>2</sub>äquiv.) reduziert werden und im Jahr 2050 die Klimaneutralität erreicht sein (EU-Kommission, 2019; Rat der EU, 2022; UBA, 2022b). Deutschland hat 2021 in der Änderung des Klimaschutzgesetzes die Klimaneutralität für Deutschland von 2050 auf das Jahr 2045 gesetzt (Bundesgesetzblatt, 2021). Im Jahr 2019 beliefen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland auf 689 Mio. t CO<sub>2</sub>, die THG-Emissionen lagen bei 793 Mio. t CO<sub>2</sub>äquiv., das waren 36,0 % bzw. 37,9 % weniger als im Vergleichsjahr 1990 (1.077 Mio. t CO<sub>2</sub>, 1.273 Mio. t CO<sub>2</sub>äquiv.) (BMWK, 2022). In der Novelle des Bundesklimaschutzgesetzes vom August 2021 wurde festgelegt, dass die Reduktion der THG-Emissionen im Jahr 2030 65 % i. V. z. 1990 betragen soll (§ 3 KSG 2021; s. Anhang 7.17 Klima-, Energie- und Industrieziele der Bundesrepublik). 57 % der THG-Emissionen Deutschlands (ca. 512 Mio. t CO<sub>2</sub>äquiv.) stammten im Jahr 2019 aus dem Sektor Industrie, dabei war die Stahlproduktion mit ca. 7 % (ca. 37 Mio. t CO<sub>2</sub>äquiv.) daran beteiligt (Destatis, 2022e).

In allen Bereichen des täglichen Lebens und der Zukunftstechnologien, ob im Bereich Energiegewinnung, -infrastruktur oder -speicherung, Verkehr und Luftfahrt, Digitalisierung oder der Kreislaufwirtschaft, wird Stahl national und international weiterhin verbaut werden (Hund et al., 2020; Bobba et al., 2020). Die Verfügbarkeit von Stahl ist essenziell für die deutsche Wirtschaft; durch die Nachfrage nach Stahl in den verschiedenen Branchen nimmt die Stahlproduktion eine Multiplikatorrolle in der Industrie ein (Limbers et al., 2016; Anhang 7.18 Dekarbonisierung der Stahlproduktion in Deutschland). In der Rohstoffstrategie der Bundesregierung aus dem Jahr 2019 heißt es „Keine Energiewende ‚Made in Germany‘ ohne Hightech-Rohstoffe“ (BMW, 2019). In der deutschen Stahlindustrie sollen daher die Produktionsverfahren geändert werden und beispielsweise statt Erdgas in der Hochofenroute Wasserstoff in der Elektrostahlroute eingesetzt werden (WV Stahl, 2021; s. Anhang 7.18 Dekarbonisierung der Stahlproduktion in Deutschland).

Unterschiedliche Studien haben bereits die Kritikalität verschiedener metallischer Rohstoffe, die für den Bau von Elektrolyseuren benötigt werden, thematisiert und berechnet. Smolinka et al. (2018) haben verschiedene Szenarien betrachtet und den Bedarf an Elektrolyseuren und Komponenten dafür bis zum Jahr 2050 berechnet. Dabei wurde auch der Bedarf an ausgewählten Rohstoffen wie Titan, Platin, Iridium und Scandium kalkuliert und die Kritikalität bewertet (Smolinka et al., 2018). Kiemel et al. (2021) haben kritische Rohstoffe mit potenziellen zukünftigen Versorgungsengpässen identifiziert. Die genannte Studie zeigt ein mögliches Versorgungsrisiko bei Iridium, Scandium und Yttrium auf (Kiemel et al., 2021). Die Studie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ (Marscheider-Weidemann et al., 2021) kalkuliert für 14 Rohstoffe (Iridium, Platin, Titan, Aluminium, Kupfer, Zirkonium, Scandium, Yttrium, Lanthan, Nickel, Kobalt, Mangan, Cer und Chrom) den Bedarf für die Wasserelektrolyse in drei verschiedenen Szenarien im Jahr 2040 und vergleicht diese mit der Produktion und dem Bedarf der Rohstoffe aus dem Jahr 2018. Die IEA (2021a) listet notwendige Rohstoffe für die sogenannten sauberen Energien auf und betrachtet im Speziellen für die Wasserelektrolyse die Metalle Nickel, Zirkonium, Lanthan, Yttrium, Platin, Palladium und Iridium. Auch die Initiative „Wasserstoffkompass“ gibt eine Übersicht über das Rohstoffangebot und die Nachfrage für Nickel, Titan, Iridium, Palladium, Platin und Scandium (acatech und DECHEMA, 2022).

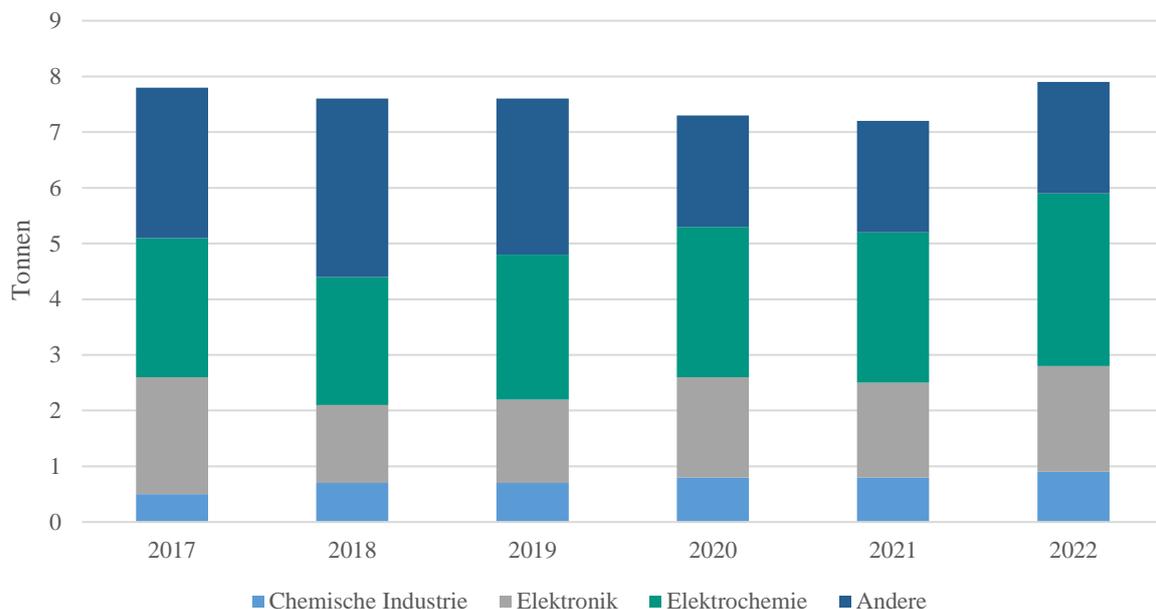
In dieser Studie wird die Erzeugung von Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland ausschließlich durch Elektrolyseure betrachtet (vgl. Anhang 7.19 Wasserstoffproduktion und Elektrolyseurtechnologien). Die Elektrolyseurtechnologien, die aufgrund ihrer Marktreife herangezogen werden, sind die alkalische Elektrolyse (AEL), die Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEMEL) und die Festoxid-Elektrolyse (SOEL). Es wird ermittelt, wie viel Elektrolysekapazität bei unterschiedlichen Anlagentypen benötigt wird, um den notwendigen Wasserstoff produzieren zu können. Es wird weiter aufgezeigt, welche potenziell kritischen Rohstoffe in den ausgewählten Elektrolyseurtypen verbaut werden. Basierend auf den im ersten Schritt kalkulierten Elektrolysekapazitäten wird in dieser Studie der Bedarf an den potenziell kritischen Rohstoffe Iridium (Ir) und Scandium (Sc) speziell für den Wasserstoffbedarf in der Stahlproduktion im Jahr 2030 berechnet.

### 4.3 Ausgangslage Iridium und Scandium

Nach der vierten Aktualisierung der Liste der kritischen Rohstoffe der EU (EU-Kommission, 2020a) sind seit dem Jahr 2020 30 Rohstoffe gelistet. Darunter befinden sich auch die hier betrachteten Metalle Iridium und Scandium.

#### Iridium

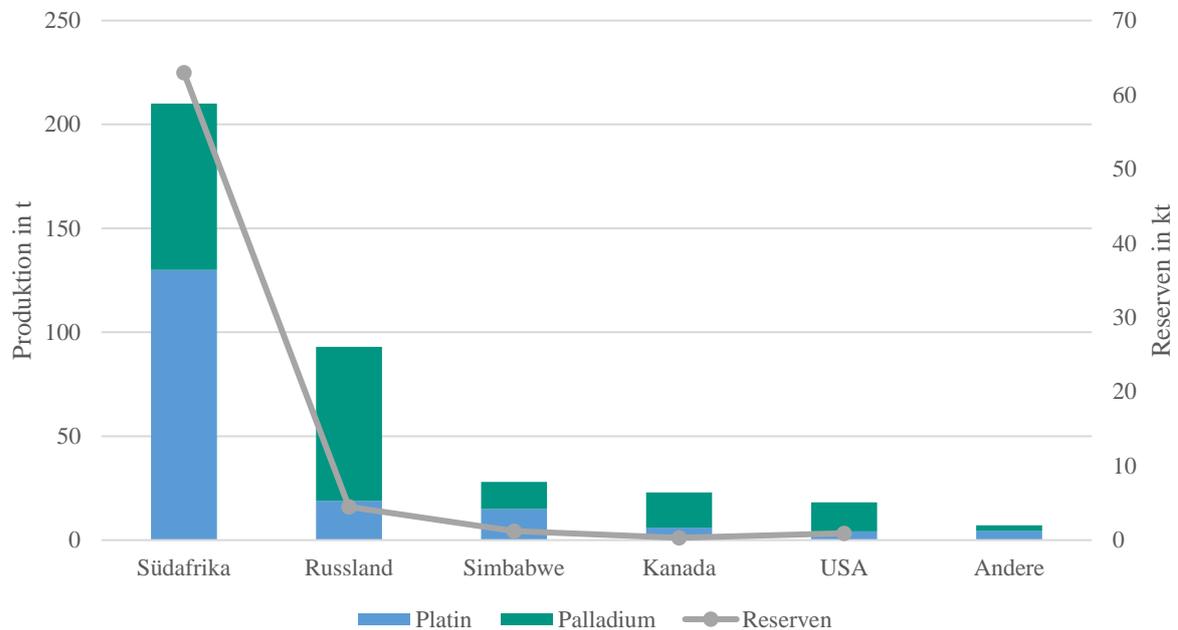
Iridium (Ir) zählt zu den Platingruppenmetallen, wie auch Platin (Pt), Osmium (Os), Palladium (Pd), Rhodium (Rh) und Ruthenium (Ru). Wirtschaftlich am relevantesten waren bisher Platin, Palladium und Rhodium, verbaut in Autoabgaskatalysatoren und der Elektrotechnik (Schmidt, 2015). Das Metall Iridium wird u. a. für korrosionsbeständigere (z. B. als Gold), härtere und temperaturfestere Legierungen, als Katalysator für die Elektrolyse von Wasser und zur Herstellung von Lithium-Tantal-Kristallen für die 5G-Technologie benötigt (Sanz et al., 2022). Der Bedarf an Iridium stieg zunächst, vor allem im Jahr 2010, aufgrund des Bedarfs in LED-Bildschirmen (Minke et al., 2021) und nun mit der Entwicklung von Katalysator-technologien für Elektrolyseure (Marscheider-Weidemann et al., 2021). Laut der Marktanalyse von Johnson Matthey's belief sich die globale Iridiumnachfrage im Jahr 2021 auf ca. 7,3 t, wovon fast 40 % (3,1 t) auf das Anwendungsgebiet der Elektrochemie fielen (Abb. 4.1, Cowley, 2022).



**Abbildung 4.1:** Globale Nachfrage nach Iridium in den Jahren 2017 bis 2022 (nach Cowley, 2022).

Iridium wird als Beiprodukt bei der Raffination von Platin- und Palladiumerz (z. B. Südafrika) sowie Nickel- und Kupfer-Erzen gewonnen (z. B. Russland) (DERA, 2022). Die globale Platinproduktion belief sich im Jahr 2021 auf ca. 180 t, wovon in Südafrika 130 t und in Russland 19 t gefördert wurden (Abb. 4.2; USGS 2022). Die Bergwerksförderung von Palladium wird für das gleiche Jahr mit ca. 200 t Metall angegeben, wovon 80 t in Südafrika und 74 t in Russland gefördert wurden (USGS, 2022). Die globalen Platingruppenmetall-Ressourcen werden seit 2002 konstant auf 100 kt geschätzt, die globalen Reserven wurden für das Jahr 2021 mit 70 kt angegeben (USGS, 2022). Die

DERA geht von einer Iridiumproduktion für das Jahr 2020 von ca. 8 t aus (DERA, 2022). Die globale End-of-Life Recycling Rate (EOL-RR) von Iridium wird mit ca. 20 bis 30 %, die EOL-RIR (End-of-Life Recycling Input Rate) wird mit 14 % angegeben (Minke et al., 2021; Talens Peiró et al., 2018).



**Abbildung 4.2:** Globale Platin- und Palladiumproduktion und Reserven im Jahr 2021 (USGS, 2022).

## Scandium

Das silberweiße Leichtmetall Scandium (Sc) wird aufgrund seiner geringen Konzentration (0,5–100 ppm) nur als Beiprodukt bei der Raffination von verschiedenen Erzen in China (Eisenerz, Titan, Zirkon, Seltene Erden Elemente), Kasachstan (Uran), auf den Philippinen (Nickel), in Russland (Apatit und Uran) und in der Ukraine (Uran) gewonnen (DERA, 2022; USGS, 2022; Sanz et al., 2022a). Scandium-führende Ressourcen wurden außerdem in Australien, Kanada, Finnland, Guinea, Madagaskar, Norwegen, Südafrika und den Vereinigten Staaten entdeckt (USGS, 2022). Aus Russland wird die erfolgreiche Gewinnung von Scandium als Beiprodukt in der Pilotanlage bei der Aluminium-Raffination berichtet (USGS, 2022). Mit dem Anstieg der Nachfrage für Festoxid-Elektrolyse und Festoxid-Brennstoffzellen, in denen scandiumdotiertes Zirkoniumoxid verwendet wird, stieg auch die Nachfrage nach Scandium. Scandium wird außerdem in korrosionsfesten Legierungen, Lampen und 3-D-Druckern benötigt (Sanz et al., 2022a; EU-Kommission, 2021a; Marscheider-Weidemann et al., 2021). Die DERA (2022) schätzt die jährliche globale Produktion auf ca. 14–16 t Scandiumoxid, wobei ca. 10 t in China und ca. 1–2 t in Russland gewonnen werden. Der USGS (2022) geht von 15–25 t/a Scandiumoxid aus. Talens Peiró et al. (2018) geben die End-of-Life Recycling Input Rate (EOL-RIR) mit 0 % an.

## 4.4 Methodik

Um den Bedarf an potenziell kritischen Rohstoffen in Elektrolyseuren, die zur Erzeugung von Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland dienen sollen (Grundszenario = Einsatzbereich 1 = EB1), über die zu installierende Elektrolyseurleistung berechnen zu können, werden zunächst vier Annahmen getroffen. Basierend auf einer Recherche wird der Wasserstoffbedarf in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland bestimmt (Kap. 4.5.1, Annahme 1). Mittels einer weiteren Recherche werden die Elektrolyseurtechnologien und Anlagenmodelle ausgewählt (Annahme 2). Es werden zwei Volllaststunden-Fälle aufgestellt (Fall 1 und Fall 2, Annahme 3), die zur Berechnung der benötigten installierten Elektrolyseurleistung [MW] herangezogen werden. In Fall 1 werden die Volllaststunden mittels der technischen Angaben der Hersteller (aus Annahme 2) und dem Heizwert von Wasserstoff (33,3 kWh/kg) ermittelt (Gl. 1 und 2).

$$H_2\text{-Produktion [kg/h]} \times 33,3 \text{ [kWh/kg]} \times \text{Anlagenverfügbarkeit [\%]} \times 8760 \text{ [h]} = H_2 \text{ Produktion [kWh/a]} \quad (1)$$

$$\text{Jahresproduktion } H_2 \text{ [kWh]} \div \text{installierte Leistung [kW]} = \text{Volllaststunden [h]} \quad (2)$$

Fall 2 wird durch die Volllaststundenangaben der Bundesregierung von 4.000 h bestimmt (Bundesregierung, 2020a, 2021). Nicht mit in die Rohstoffbedarfsrechnung einbezogen wird die notwendige Infrastruktur zum Transport und zur Speicherung von Wasserstoff (Annahme 4). Nachdem der stoffliche Wasserstoffbedarf festgelegt, die Elektrolyseurtechnologien und -modelle ausgewählt und die beiden zu berechnenden Fälle definiert sind, wird die notwendige Elektrolyseurleistung für die beiden definierten Fälle ermittelt (Kap. 4.5.2). Diese dient als Grundlage für die Berechnung der erforderlichen Rohstoffmenge von Iridium und Scandium.

Für die Kalkulation der zu installierenden Elektrolyseurleistung in Fall 1 wird in Kap. 4.5.2 zunächst die Wasserstoffjahresproduktion [ $m^3$ ] eines Elektrolyseurs je Technologie berechnet (Gl. 3). Mittels der in Annahme 1 festgelegten benötigten Wasserstoffmenge [ $m^3$ ] für die Stahlproduktion und den in Annahme 2 definierten Marktanteilen [%] der Elektrolyseurtechnologien wird die Anzahl der benötigten Elektrolyseure je Technologie im Jahr 2030 ermittelt (Gl. 4, aufgerundet zu ganzen Elektrolyseuren).

$$H_2\text{-Produktion [m}^3\text{/h]} \times \text{Anlagenverfügbarkeit [\%]} \times 8760 \text{ [h]} = \text{Jahresproduktion } H_2 \text{ [m}^3\text{]} \quad (3)$$

$$H_2\text{-Bedarf Stahlproduktion [m}^3\text{]} \div \text{Jahresproduktion } H_2 \text{ [m}^3\text{]} \times \text{prognostizierter Marktanteil [\%]} = \text{Anzahl benötigter Elektrolyseure je Technologie} \quad (4)$$

Über die Anzahl der Elektrolyseure (Gl. 4) kann die zu installierende Elektrolyseurleistung (Gl. 5) je Elektrolyseurtechnologie (Anlagenmodell) und durch Aufsummierung im Gesamten berechnet werden.

$$\begin{aligned} & \text{Anzahl benötigter Elektrolyseure der jeweiligen Technologie} \times \text{Energiebedarf [MW]} \\ & = \text{benötigte installierte Elektrolyseurleistung [MW]} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Sigma \text{ benötigte installierte Elektrolyseurleistung [MW]} \quad (6)$$

Die Jahresproduktion einer Elektrolyseurtechnologie (Gl. 7) wird durch die Multiplikation der Jahresproduktion eines Elektrolyseurs (Gl. 3) mit der Anzahl der benötigten Elektrolyseure (Gl. 4) kalkuliert.

$$\begin{aligned} & \text{Jahresproduktion } H_2 [m^3] \times \text{Anzahl benötigter Elektrolyseure der jeweiligen Technologie} \\ & = \text{Jahresproduktion Elektrolyseurtechnologie [m}^3/\text{a]} \end{aligned} \quad (7)$$

Für die Kalkulation der zu installierenden Elektrolyseurleistung je Technologie in Fall 2 (Gl. 8) wird die berechnete zu produzierende Wasserstoffmenge im Jahr je Elektrolyseur aus Fall 1 (Gl. 3) und die von der Bundesregierung angenommene Volllaststundenzahl von 4.000 h herangezogen.

$$\begin{aligned} & H_2\text{-Jahresproduktion [m}^3] \times H_2\text{-Heizwert } 33,3 \text{ [kWh/kg]} \times H_2\text{-Dichte [kg/m}^3] \div 4.000 \text{ [h]} \\ & = \text{benötigte installierte Elektrolyseurleistung [kW]} \div 1.000 = \text{[MW]} \end{aligned} \quad (8)$$

In Kap. 4.5.3 wird die Menge an potenziell kritischen Rohstoffen in Elektrolyseuren aufgezeigt und die Begründung für die Eingrenzung der Bedarfskalkulation auf Iridium und Scandium für die Elektrolyseure gegeben. Der Bedarf dieser beiden Metalle wird dann für die beiden definierten Fälle des Grund szenarios (EB1) sowie zum Vergleich für die gesamt geplante Elektrolyseurkapazität im Jahr 2030 in Deutschland (Einsatzbereich 2 = EB2) und den maximalen Wasserstoffbedarf im Jahr 2030 in Deutschland (Einsatzbereich 3 = EB3) berechnet.

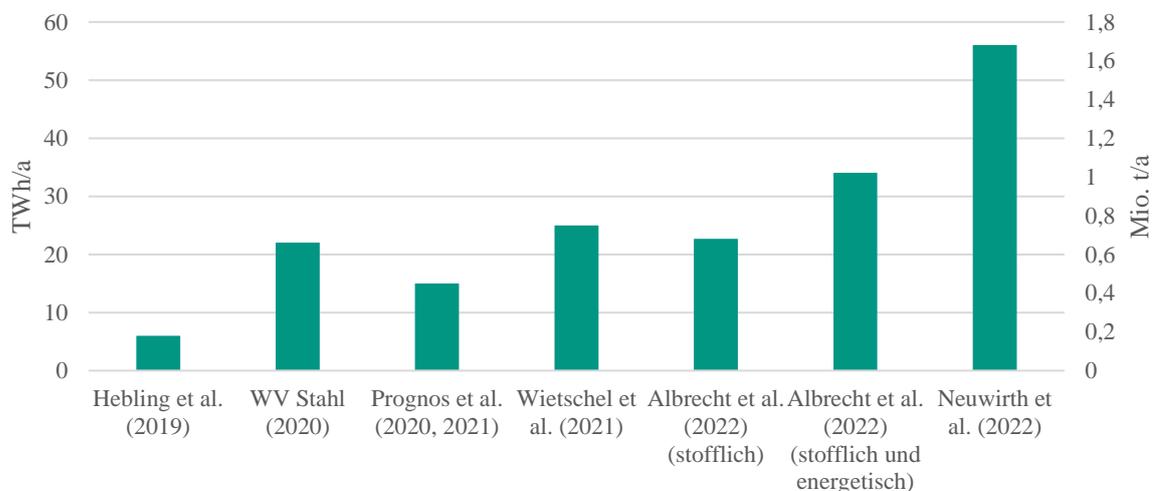
Abschließend wird eine Sensitivitätsanalyse, welche eine neue Marktverteilung der Elektrolyseurtechnologien annimmt, für alle Einsatzgebiete durchgeführt. Eine Effizienzsteigerung im Materialverbrauch wird nicht berücksichtigt, da die verwendeten Rohstoffbedarfsdaten bereits eine Prognose mit Effizienzsteigerungen darstellen (Kiemel et al., 2021; IEA, 2021a; Marscheider-Weidemann et al., 2021). Sensitivitätsanalysen werden durchgeführt, um die Auswirkung einer Veränderung der unterschiedlichen Parameter einer Gleichung zu identifizieren und zu beurteilen (Vanuytrecht et al., 2014; Iooss und Saltelli, 2017).

## 4.5 Ergebnisse

### 4.5.1 Aufstellung der Annahmen für die Iridium- und Scandium-Bedarfsrechnung

#### Annahme 1: Stofflicher Wasserstoffbedarf in der Stahlproduktion 2030 in Deutschland

Eine Studie der Fraunhofer Institute ISE und ISI berechnet für das Jahr 2030 einen Wasserstoffbedarf für die Stahlbranche von 6 TWh/a (ca. 0,18 Mio. t/a) (Hebling et al., 2019, S. 20). Als Grundlage wird ein Wasserstoffbedarf je Tonne Stahl von 1.900 kWh angenommen (Hebling et al., 2019). Außerdem geht die genannte Studie von einer Umstellung der Primärstahlkapazitäten auf Direktreduktion von ca. 17 % bei einer Beimischung von Wasserstoff zum Erdgas von 35 % aus (Hebling et al., 2019). Im Report „Klimaneutrales Deutschland“ geben Prognos gemeinsam mit dem Öko-Institut und dem Wuppertal-Institut für das Jahr 2030 einen Bedarf an Wasserstoff für Roheisen und Stahl von 15 TWh/a an (ca. 0,5 Mio. t/a) bei einer Direktreduktionskapazität von 11 Mio. t (Prognos et al., 2021, S. 26; Prognos et al., 2021a, S. 50). Die Wirtschaftsvereinigung Stahl (2020) erklärt, dass für die Umstellung eines Drittels der Stahlproduktion im Jahr 2030 0,66 Mio. t/a (ca. 22 TWh/a) Wasserstoff nötig sind (WV Stahl, 2020, S. 31). Eine Metastudie, die vom Nationalen Wasserstoffrat in Auftrag gegeben wurde, ermittelt eine Bandbreite des Wasserstoffbedarfs in der Eisen- und Stahlindustrie von 0 bis 25 TWh/a (0–0,75 Mio. t/a) (Wietschel et al., 2021, S. 25). Albrecht et al. (2022, S. 50) kalkulieren eine Bandbreite von 0 bis 0,68 Mio. t/a (0 bis ca. 22,6 TWh/a) für den stofflichen Wasserstoffbedarf basierend auf fünf Studien (ewi, 2021; Fraunhofer ISI, 2021; Robinius et al., 2020; Prognos et al., 2021; UBA, 2021) und geben die Bandbreite des stofflichen und energetischen Wasserstoffbedarfs für das Jahr 2030 für die Stahlproduktion in Deutschland mit 0–34 TWh/a an (0–1,02 Mio. t/a). Neuwirth et al. (2022) kalkulierten 56 TWh/a (ca. 1,68 Mio. t/a) Wasserstoff, wenn die derzeit noch sich in Betrieb befindenden Primärrouen komplett umgestellt werden würden (Abb. 4.3; Tab. 4.1).



**Abbildung 4.3:** Wasserstoffbedarf in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland nach verschiedenen Quellen. Die Angabe von Neuwirth et al. (2022) ist nicht auf das Jahr 2030 bezogen, der Bedarf ist angegeben für den Zeitpunkt, in dem die komplette Umstellung der Primärrouen der Stahlproduktion erfolgt.

**Tabelle 4.1:** Wasserstoffbedarf in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland nach verschiedenen Quellen. Die Angabe von Neuwirth et al. (2022) ist nicht auf das Jahr 2030 bezogen, der Bedarf ist angegeben für den Zeitpunkt, in dem die komplette Umstellung der Primärroute der Stahlproduktion erfolgt. (\*stofflich)

Studie	Herstellung et al. (2019)	WV Stahl (2020)	Prognose et al. (2022)	Wasserstoff et al. (2022)	Albrecht et al. (2022)	Neuwirth et al. (2022)
TWh/a	6	22	15	25	<b>22,6*</b>	56
Mio. t/a	0,18	0,66	0,45	0,75	<b>0,68*</b>	1,68

Für die Berechnung des Rohstoffbedarfs der Elektrolyseure wird der stoffliche Wasserstoffbedarf für die Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland von Albrecht et al. (2022) herangezogen (EB1), weil diese Metastudie explizit den stofflichen und energetischen Wasserstoffbedarf getrennt benennt. Weiter stellt der von Albrecht et al. (2022) kalkulierte stoffliche Wasserstoffbedarf den Median der recherchierten Studien dar und kommt den Angaben der Wirtschaftsvereinigung Stahl (2020) am nächsten.

### Annahme 2: Wasserstoffproduktion und Auswahl der Elektrolyseurtechnologien

Für das Fallbeispiel wird angenommen, dass der Wasserstoffbedarf für die stoffliche Nutzung in der Stahlproduktion ausschließlich mittels der Elektrolyse von Wasser in Elektrolyseuren hergestellt wird („grüner“ Wasserstoff; vgl. Anhang 7.19). Smolinka et al. (2018) geben für das Jahr 2030 basierend auf der Annahme der Wettbewerbsfähigkeit eine Marktverteilung des Zubaus der Elektrolyseurtechnologien in Deutschland von ca. 45 % Alkalische Elektrolyse (AEL), 45 % Proton-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEMEL) und 10 % Festoxid-Elektrolyse (SOEL) an (Tab. 4.2). Die Auswahl der Elektrolyseurmodelle wird anhand von bestehenden Wasserstoffprojekten in Deutschland und der Verfügbarkeit von technischen Datenblättern getroffen.

Die Siemens AG nahm im Jahr 2019 den Auftrag an, einen PEM-Elektrolyseur des Typs Silyzer für das Projekt „Windwasserstoff Salzgitter“ an die Salzgitter AG zu liefern (Siemens AG, 2019). Im Jahr 2020 lieferte die sunfire GmbH für das Projekt GrInHy2.0 einen Festoxid-Elektrolyseur (auch Hochtemperatur-Elektrolyseur) des Typs HYLINK SOEC an die Salzgitter AG (sunfire GmbH, 2020). Die durchschnittliche Laufzeit von Elektrolyseuren wird von Herstellern und der Literatur mit 20 Jahren angegeben (Smolinka et al., 2018; Siemens Energy, 2019, 2021; Sunfire GmbH, 2021, 2021a). Die Abnutzung einzelner Komponenten kann in einem kürzeren Zeitraum erfolgen (vgl. Sun et al., 2014; Yan et al., 2017; Tomic et al, 2023), dies wird in dieser Studie jedoch nicht berücksichtigt.

**Tabelle 4.2:** Marktverteilung der Elektrolyseurtechnologien für das Jahr 2030 in Deutschland sowie für die vorliegende Studie herangezogene Elektrolyseurmodelle (nach Smolinka et al., 2018; Siemens Energy, 2019; Sunfire GmbH, 2021, 2022).

Marktanteil	Herstellungsverfahren H <sub>2</sub>	Elektrolyseurmodell
45 %	Alkalische Elektrolyse (AEL)	Hylink Alkali, sunfire GmbH
45 %	Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEMEL)	Silyzer 300, Siemens Energy
10 %	Festoxid-Elektrolyse (SOEL)	Hylink SOEC, sunfire GmbH

### Annahme 3: Volllaststunden

Fall 1: Mittels der Angaben der Hersteller über die Anlagenverfügbarkeit, die Produktionsrate und den Wirkungsgrad können für die drei Elektrolyseurmodelle jeweils die Volllaststunden von 5.300 h (AEL), 5.384 h (PEMEL) und 6.920 h (SOEL) berechnet werden (Gl. 1, 2; Tab. 4.3).

**Tabelle 4.3:** Technische Daten der zur weiteren Berechnung herangezogenen Elektrolyseurtechnologien (Siemens Energy 2019, 2021; sunfire GmbH, 2021, 2021a, 2022). Die blau und kursiv geschriebenen Zahlen sind Angaben der Hersteller, die schwarz geschriebenen wurden selbst berechnet.<sup>15</sup>

Modell	Hylink Alkaline (AEL)	Silyzer 300 (PEMEL)	Hylink SOEC (SOEL)
Laufzeit [Jahre]	20	20	20
Anlagenverfügbarkeit	95 %	95 %	95 %
Anlageneffizienz (Wirkungsgrad)	64 %	75 %	84 %
Energiebedarf [MW]	10,5	17,5	2,7
Energieverbrauch [kWh/m <sup>3</sup> ]	4,7	5	3,6
H <sub>2</sub> -Produktion [m <sup>3</sup> /h]	2230	3.782	750
H <sub>2</sub> -Produktion [kg/h]	200,45	340	67
H <sub>2</sub> -Produktion [kWh/a]	55.550.528	94.221.684	18.682.913
Volllaststunden [h]	5.300	5.384	6.920

Fall 2: Die Bundesregierung kalkuliert mit einer Volllaststundenzahl von 4.000 h und einem Wirkungsgrad von 70 % (Bundesregierung, 2020a, 2021). Auch die acatech und DECHEMA (2022a) ziehen eine Volllaststundenanzahl von 4.000 h für Elektrolyseure für ihre Berechnungen der Elektrolysekapazitäten im Jahr 2030 heran. Aus diesen Gründen wird in Fall 2 die Volllaststundenanzahl mit 4.000 h angenommen. Es wird weiter angenommen, dass darin die Anlagenverfügbarkeit gemäß den Angaben der Hersteller enthalten ist.

### Annahme 4: Infrastruktur

Aufgrund der Tatsache, dass noch nicht feststeht, wie sich die Infrastruktur sowie die Speichermöglichkeiten von Wasserstoff in Deutschland gestalten und etablieren werden, wird die Infrastruktur für Transport und Speicherung des Wasserstoffs nicht berücksichtigt.

### Übersicht der Annahmen

Tabelle 4.4 fasst die vier Grundannahmen für die Bedarfsrechnung an Iridium und Scandium für die Elektrolyseure zusammen.

<sup>15</sup> Hinweis: Nach eigenen Berechnungen liegt der Wirkungsgrad des Silyzer 300 bei einer H<sub>2</sub>-Produktion von 340 kg/h und einem Energiebedarf von 17,5 MW nicht bei 75 %, sondern bei 64,7 % ( $340 \text{ [kg/h]} \times 33,3 \text{ [kWh/kg]} = 11.322 \text{ kW} \div 17.500 \text{ kW} = 64,7 \%$ ).

**Tabelle 4.4:** Annahmeübersicht für die Berechnung des Bedarfs an kritischen Rohstoffen (Iridium und Scandium).

Annahme		2030
1	Wasserstoffbedarf in der Stahlproduktion (stofflich)	0,68 Mio. t (Albrecht et al., 2022)
2	Wasserstoffproduktion	Wasserelektrolyse: AEL, PEMEL, SOEL
3	Volllaststunden	Fall 1 gem. Herstellerangaben (s. Tab. 4.3)
		Fall 2 gem. Bundesregierungsangaben
4	Infrastruktur	wird nicht berücksichtigt

Als Vergleichsfälle für die Berechnung des Rohstoffbedarfs der Elektrolyseure im Grundszenario (EB1) werden zwei weitere Einsatzbereiche herangezogen: die von der Bundesregierung angestrebten 10 GW Elektrolysekapazitäten im Jahr 2030 (EB2) sowie die von acatech und DECHEMA (2022a) maximal prognostizierten 89,3 GW notwendigen Elektrolysekapazitäten für den Bedarf in Deutschland im Jahr 2030 (EB3). Die angestrebte Elektrolysekapazität im Jahr 2030 in Deutschland wurde von der Bundesregierung im Juni 2022 von 5 GW auf 10 GW erhöht, diese soll 28 TWh/a Wasserstoff erzeugen (Bundesregierung, 2022). Acatech und DECHEMA (2022a) gehen davon aus, dass im Jahr 2030 zwischen 4,3 GW und 7,6 GW Elektrolysekapazitäten in Deutschland errichtet sein werden, was bei 4.000 Volllaststunden (vgl. Bundesregierung, 2021) und einem Wirkungsgrad der Elektrolyseure von 70 % eine Wasserstoffproduktion zwischen 0,36 Mio. t und 0,64 Mio. t (ca. 12,0 TWh und 21,6 TWh)<sup>16</sup> ermöglichen würde (acatech und DECHEMA, 2022a). Die derzeitige (Ende 2022) Elektrolysekapazität in Deutschland beträgt 0,17 MW (pers. com. acatech (M. Löffler), 2022). Weiter gehen acatech und DECHEMA (2022a) davon aus, dass der Wasserstoffbedarf im Jahr 2030 Deutschland zwischen 50 TWh (ca. 1,5 Mio. t) und 250 TWh (ca. 7,51 Mio. t) betragen wird. Dies würde eine Elektrolysekapazität von 17,9 GW bis 89,3 GW erfordern.

## 4.5.2 Bedarf Elektrolysekapazität

Im Fall 1 ergibt sich mittels der Wasserstoffproduktion einer Anlage (Gl. 3) auf ganze Anlagen aufgerundet ein Bedarf an 184 AEL, 109 PEMEL und 122 SOEL (Gl. 4). Für die Deckung des stofflichen Wasserstoffbedarfs von 0,68 Mio. t pro Jahr (ca. 7,6 Mrd. m<sup>3</sup>/a) für die Stahlproduktion in Deutschland im Jahr 2030 wird eine installierte Elektrolysekapazität von insgesamt ca. 4.165 MW (Gl. 6) benötigt, die sich entsprechend der Marktanteile auf 1.929 MW AEL, 1.908 MW PEMEL und 329 MW SOEL aufteilt (Gl. 5, Tab. 4.5). Durch die Aufrundung der Anzahl an Elektrolyseuren zur Betrachtung von ganzen Anlagen werden ca. 3,8 kt (ca. 42 Mio. m<sup>3</sup>) Wasserstoff mehr produziert werden können, als benötigt werden (Addition der H<sub>2</sub>-Produktionsmengen der Gl. 7). Die benötigte installierte Elektrolysekapazität im Fall 2 beträgt gesamt 5.693 MW und ergibt sich gemäß Gl. 8 für AEL mit 2.555 MW, für PEMEL mit 2.568 MW

<sup>16</sup> In einer persönlichen Korrespondenz mit acatech am 17. Oktober 2022 wurde eine aktualisierte Elektrolyseurkapazität von 11,6 GW (inkl. nicht datierter Projekte) für das Jahr 2030 in Deutschland dargelegt. Mit 4.000 Volllaststunden und einem Wirkungsgrad von 70 % der Elektrolyseure könnte dies im Jahr 2030 für eine Produktion von ca. 32,5 TWh (0,98 Mio. t) Wasserstoff sorgen (acatech (M. Löffler), 2022).

und für SOEL mit 570 MW. Diese für Fall 1 und 2 kalkulierten Elektrolysekapazitäten werden als Basis für die Rohstoffbedarfsrechnung in Kap. 4.5.3 verwendet.

**Tabelle 4.5:** Berechnung der Elektrolysekapazitäten in Fall 1 und Fall 2 für die Wasserstoffproduktion für die stoffliche Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland (Marktverteilung und technische Daten nach Smolinka et al., 2018; Sunfire GmbH, 2021, 2021a, 2022; Siemens Energy, 2019, 2021, s. Kapitel 4.5.1).

Elektrolyseurtechnologie		Alkalische Elektrolyse (AEL)	Proton-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEMEL)	Festoxid-Elektrolyse (SOEL)
Modell		HYLINK Alkaline (sunfire GmbH)	Silyzer 300, 24 Modules (Siemens Energy)	HYLINK SOEC (sunfire GmbH)
H <sub>2</sub> -Produktion [m <sup>3</sup> /a] einer Anlage	Gl. 3	18.558.060	31.477.139	6.241.500
Anzahl benötigter Elektrolyseure (aufgerundet)	Gl. 4	184	109	122
Benötigte installierte Elektrolyseleistung [MW] Fall 1	Gl. 5	1.929	1.908	329
H <sub>2</sub> -Produktion [m <sup>3</sup> /a] für den H <sub>2</sub> -Bedarf in der Stahlproduktion, anteilig Marktanteil	Gl. 7	3.414.683.040	3.431.008.121	761.463.000
Benötigte installierte Elektrolyseleistung [MW] Fall 2	Gl. 8	2.555	2.568	570

### 4.5.3 Potenziell kritische Rohstoffe in Elektrolyseuren

Tabelle 4.6 stellt eine Übersicht der benötigten Rohstoffe der drei Elektrolyseurtechnologien AEL, PEMEL und SOEL dar. Die Berechnung zum Bedarf potenziell kritischer Rohstoffe in den Elektrolyseurtechnologien wird in diesem Fallbeispiel auf die Technologien PEMEL und SOEL eingegrenzt, da beim Bau von AEL nicht zwangsweise potenziell kritische Rohstoffe zum Einsatz kommen müssen (Kiemel et al., 2021). Exemplarisch wird für jede Technologie ein potenziell kritischer Rohstoff im Hinblick auf die notwendigen Rohstoffmengen für Deutschland betrachtet. Die beiden Rohstoffe mit dem prognostizierten größten Anstieg im Bedarf (DERA, 2022; Marscheider-Weidemann et al. 2021) und entsprechenden hohen Beschaffungsrisiken werden ausgewählt (Kiemel et al., 2021).

Iridium wird als Katalysator in der Anode in einem PEMEL und Scandium als Dotierungsstoff in einem SOEL eingesetzt. Nach Smolinka et al. (2018) wird der Bedarf an Iridium für PEMEL im Jahr 2030 bei 0,1 kg/MW liegen, der für Scandium bei 2 kg/MW. Marscheider-Weidemann et al. (2021) geben ebenfalls 0,1 kg/MW für den Iridiumbedarf an, der Scandiumbedarf wird mit 0,1 kg/MW geringer angegeben als bei Smolinka et al. (2018). Aufgrund der höheren Aktualität der Marscheider-Weidemann et al. (2021) Studie werden diese Werte in der vorliegenden Studie für die Berechnung des Rohstoffbedarfs in den entsprechenden Elektrolyseurtechnologien herangezogen.

**Tabelle 4.6:** Rohstoffbedarf in Elektrolyseurtechnologien (nach DERA, 2022; acatech und DECHEMA, 2022; Bellini et al., 2022; Marscheider-Weidemann et al., 2021; Kiemel et al., 2021; Grünberg, 2021; IEA, 2021a; Bareiß et al., 2019; Smolinka et al., 2018; Zauner und Reiter, 2017). \*Kritische Rohstoffe gemäß der 4. Aktualisierung der Liste der kritischen Rohstoffe der EU (EU-Kommission, 2020a). AEL = Alkalische Elektrolyse, PEMEL = Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse, SOEL Festoxid-Elektrolyse.

Rohstoff	Nicht spezifiziert	AEL	PEMEL	SOEL	Anwendung
Platin*	•	•	•		Katalysator, Kathode, Bipolarplatte
Iridium*	•		•		Katalysator, Anode
Ruthenium	•		•		Katalysator, Anode
Palladium*	•		•		Katalysator
Titan*	•		•		Bipolarplatten, poröse Transportschichten
Scandium*	•			•	Dotierstoff des Zirkoniumdioxid-Elektrolyten
Yttrium*	•			•	Dotierstoff des Zirkoniumdioxid-Elektrolyten
Lanthan*	•			•	Katalysator, Anode, Kathode
Cer*	•			•	Dotierstoff des Zirkoniumdioxid-Elektrolyten, Kathode dotiertes Ceroxid
Gadolinium	•			•	Diffusionsbarriere Gadolinium-dotiertes Ceroxid
Zirkonium*	•	•		•	Festelektrolyt
Kobalt*	•	•		•	Katalysator, Kathode
Nickel	•	•		•	AEL: Anode, Kathode, Bipolarplatten, anodenseitige Transportschicht SOEL: Kathode
Chrom	•			•	Chrom-basierte Legierungen
Mangan	•			•	Anode
Kupfer	•	•			Katalysator
Aluminium	•	•			Gehäuse
Stahl	•	•	•	•	Gehäuse und auch z. B. Bipolarplatte, Interkonnektor

### Bedarfsrechnung Iridium und Scandium

Basierend auf der berechneten notwendigen installierten Elektrolysekapazität für die Wasserstoffherstellung für die stoffliche Nutzung in der Stahlproduktion in Deutschland im Jahr 2030 (EB1; Kap. 4.5.2) ergibt sich ein Iridiumbedarf für Fall 1 von 190,75 kg und für Fall 2 von 256,75 kg, was ca. 2,8 % und 3,8 % der globalen Iridiumförderung im Jahr 2018 (ca. 6,8 t) darstellt. Der Scandiumbedarf in Fall 1 beläuft sich auf 32,94 kg, in Fall 2 auf 56,98 kg, das ca. 0,4 % bzw. 0,6 % der globalen Förderung von Scandium im Jahr 2018 (ca. 14 t) darstellt (Tab. 4.7).

Nimmt man die gleiche Marktverteilung der Elektrolyseurtechnologien (vgl. Kap. 4.5.1 Annahme 2) für die angestrebte Elektrolyseurkapazität der Bundesregierung (2022) für das Jahr 2030 an (EB2), ergeben sich ein Iridiumbedarf von ca. 450 kg, was ca. 6,6 % der globalen Iridiumförderung im Jahr 2018 darstellt, und ein Scandiumbedarf von ca. 100 kg, was ca. 1,1 % der globalen Förderung im Jahr 2018 ausmacht. Zieht man die Angabe des maximalen Wasserstoffbedarfs von 250 TWh von acatech und DECHEMA (2022a) heran (EB3), werden für die benötigte installierte Leistung (insgesamt 89,3 GW) ca. 4 t Iridium, was ca. 59,1 % der globalen

Iridiumförderung im Jahr 2018 darstellt, und ca. 0,9 t Scandium, was ca. 9,8 % der globalen Förderung im Jahr 2018 ausmacht, benötigt.

**Tabelle 4.7:** Bedarf der potenziell kritischen Rohstoffe Iridium und Scandium in den Elektrolyseurtechnologien PEMEL und SOEL für die Fälle 1 (mit Volllaststunden nach Herstellerangaben; s. Tab. 4.3) und 2 (mit Volllaststunden nach Annahme der Bundesregierung; 4.000 h) für die Wasserstoffproduktion für den stofflichen Einsatz in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland (EB 1; ca. 4,2 GW), für die Zielkapazität der Bundesregierung (2022) für das Jahr 2030 (EB 2; 10 GW) und für den maximalen Wasserstoffbedarf im Jahr 2030 in Deutschland (acatech und DECHEMA, 2022) (EB 3; 89,3 GW) im Vergleich zur Materialförderung im Jahr 2018 (\*nach Marscheider-Weidemann et al., 2021). EB = Einsatzbereich.

Elektrolyseur	Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEMEL)				Festoxid-Elektrolyse (SOEL)			
Kritischer Rohstoff	Iridium				Scandium			
Prognostizierter Bedarf [kg/MW]	0,1				0,1			
Iridium-Raffinadeproduktion im Jahr 2018 [t]*	6,8							
Scandium-Bergwerksförderung im Jahr 2018 [t]*					9,1			
Einsatzbereiche	Grundszenario EB 1		EB 2	EB 3	Grundszenario EB 1		EB 2	EB 3
	Fall 1	Fall 2			Fall 1	Fall 2		
Benötigte installierte Kapazität [MW]	1.908	2.568	4.500	40.179	329	570	1.000	8.929
Rohstoffbedarf [kg]	190,75	256,75	450,00	4017,86	32,94	56,98	100,00	892,86
Rohstoffbedarf anteilig an der globalen Produktion bzw. Förderung im Jahr 2018	2,8 %	3,8 %	6,6 %	59,1 %	0,4 %	0,6 %	1,1 %	9,8 %

### Sensitivitätsanalyse der Iridium- und Scandium-Bedarfsrechnung

Die IEA (2022a) geht davon aus, dass in Europa im Jahr 2030 die Marktanteile der Elektrolyseurtechnologien sich nicht nur auf AEL, PEMEL und SOEL verteilen werden, sondern dass auch die Technologie der Anion-Austausch-Membran-Elektrolyse (AEMEL) installiert sein wird. In den herangezogenen Studien (Smolinka et al., 2018; Marscheider-Weidemann et al., 2021) wurde die AEMEL aufgrund ihres bis dato noch nicht industriell ausgereiften Technologiegrades (TRL 2-3, Stand 2020, Miller et al., 2020) nicht weiter betrachtet. Global gesehen lag die Marktaufteilung im Jahr 2021 bei ca. 70 % AEL, ca. 25 % PEMEL und die restlichen 5 % wurden hauptsächlich von SOEL und AEMEL eingenommen (IEA, 2022a). Aufgrund der IEA-Prognose (IEA, 2022a) wird die AEMEL-Technologie in der Sensitivitätsanalyse mit herangezogen und die technischen Daten des Elektrolyseurs AEM-Multicore von Enapter angewendet. Die Hersteller der bisher herangezogenen Elektrolyseurmodelle werden übernommen (Tab. 4.8, Tab. 4.9). Mit dem Ausschließen der IEA-Kategorie „Sonstige“ ergibt sich eine Marktverteilung für das Jahr 2030 für das Fallbeispiel in Deutschland von ca. 40 % AEL, ca. 51 % PEMEL, ca. 6 % SOEL und ca. 3 % AEMEL (vgl. IEA, 2022a; Tab. 4.8).

Die AEMEL hat den Anspruch, die Vorteile aus AEL und PEMEL zu kombinieren (Marscheider-Weidemann et al., 2021) und stellt bezüglich des Rohstoffverbrauchs eine Alternative zur PEMEL und SOEL dar, die auf Edelmetalle verzichten kann (Kiemel et al., 2021). Im Jahr 2022 konnte die

in Berlin ansässige Enapter AG mit der Serienproduktion von AEMELs in Pisa beginnen. Es liegen verschiedene Bestellungen aus der Industrie für das Elektrolyseurmodell AEM-Multicore dem Unternehmen vor und die Enapter AG plant bis im Jahr 2023 230 MW Elektrolyseurkapazität dem Markt zur Verfügung zu stellen, was die Marktverteilung der Technologien neu ordnen könnte (Enapter, 2022, 2022a, 2023a; IEA, 2022a).

**Tabelle 4.8:** Sensitivitätsanalyse: Marktverteilung der Elektrolyseurtechnologien für das Jahr 2030 in Deutschland (nach IEA, 2022a; Siemens Energy, 2019; Sunfire GmbH, 2021, 2022; Enapter, 2023).

Marktanteil	Herstellungsverfahren H <sub>2</sub>	Elektrolyseurmodell
40 %	Alkalische Elektrolyse (AEL)	Hylink Alkali, sunfire GmbH
51 %	Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEMEL)	Silyzer 300, Siemens Energy AG
6 %	Festoxid-Elektrolyse (SOEL)	Hylink SOEC, sunfire GmbH
3 %	Anion-Austausch-Membran-Elektrolyse (AEMEL)	AEM-Multicore, Enapter AG

**Tabelle 4.9:** Sensitivitätsanalyse: Technische Daten der Elektrolyseurmodelle inkl. der AEMEL von Enapter (Siemens Energy 2019, 2021; sunfire GmbH, 2021, 2021a, 2022; Enapter 2023). Die blau und kursiv geschriebenen Zahlen sind Angaben der Hersteller, die schwarz geschriebenen wurden selbst berechnet.

Anlagenbezeichnung	Hylink Alkaline (AEL)	Silyzer 300 (PEMEL)	Hylink SOEC (SOEL)	AEM-Multicore (AEMEL)
Laufzeit [Jahre]	20	20	20	20
Anlagenverfügbarkeit	95 %	95 %	95 %	95 %
Anlageneffizienz (Wirkungsgrad)	64 %	75 %	84 %	k. A.
Energiebedarf [MW]	10,5	17,5	2,7	1,0
Energieverbrauch [kWh/m <sup>3</sup> ]	4,7	5	3,6	4,8
H <sub>2</sub> -Produktion [m <sup>3</sup> /h]	2230	3.782	750	210
H <sub>2</sub> -Produktion [kg/h]	200,45	340	67	19
H <sub>2</sub> -Produktion [kWh/a]	55.550.528	94.221.684	18.682.913	5.231.216
Volllaststunden [h]	5.300	5.384	6.920	5.190

In der Sensitivitätsanalyse im Grundszenario (EB1), Fall 1 ergibt sich mittels der Wasserstoffproduktion einer Anlage (Gl. 3) auf ganze Anlagen aufgerundet für das Jahr 2030 ein Bedarf an 164 AEL, 124 PEMEL, 70 SOEL und 124 AEMEL (Gl. 4). Für die Deckung des stofflichen Wasserstoffbedarfs von 0,68 Mio. t (ca. 7,6 Mrd. m<sup>3</sup>/a) pro Jahr für die Stahlproduktion in Deutschland im Jahr 2030 wird mit der neuen Marktverteilung eine installierte Elektrolysekapazität von insgesamt ca. 4.078 MW (Gl. 6) benötigt, die sich entsprechend der Marktanteile auf 1.719 MW AEL, 2.170 MW PEMEL, 189 MW SOEL und 125 MW AEMEL aufteilt (Gl. 5, Tab. 4.10). Durch die Aufrundung der Anzahl an Elektrolyseuren zur Betrachtung von ganzen Anlagen werden ca. 3,2 kt (ca. 35,5 Mio. m<sup>3</sup>) Wasserstoff mehr produziert als benötigt werden (Addition der H<sub>2</sub>-Produktionsmengen der Gl. 7). Die benötigte installierte Elektrolysekapazität in der Sensitivitätsanalyse im Grundszenario (EB1), Fall 2 ergibt sich gemäß Gl. 8 für AEL mit 2.278 MW, für PEMEL mit 2.921 MW, für SOEL mit 327 MW und für AEMEL mit 162 MW. Diese neu kalkulierten Elektrolysekapazitäten werden weiter in der Sensitivitätsanalyse für die Rohstoffbedarfsrechnung von Iridium und Scandium verwendet (Tab. 4.11).

**Tabelle 4.10:** Sensitivitätsanalyse: Berechnung der notwendigen Elektrolysekapazitäten im Grundszenario-EB 1 in Fall 1 und Fall 2 für die Wasserstoffproduktion für die stoffliche Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland auf Basis der angepassten Marktverteilung nach IEA (2022a) (Sunfire GmbH, 2021, 2021a, 2022; Siemens Energy, 2019, 2021; Enapter, 2023).

Elektrolyseurtechnologie		Alkalische Elektrolyse (AEL)	Proton-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEMEL)	Festoxid-Elektrolyse (SOEL)	Anion-Austausch-Membran-Elektrolyse (AEMEL)
Modell		HYLINK Alkaline (sunfire GmbH)	Silyzer 300, 24 Modules (Siemens Energy)	HYLINK SOEC (sunfire GmbH)	AEM-Multicore (Enapter)"
H <sub>2</sub> -Produktion [m <sup>3</sup> /a] einer Anlage	Gl. 3	18.558.060	31.477.139	6.241.500	1.747.620
Anzahl benötigter Elektrolyseure (aufgerundet)	Gl. 4	164	124	70	124
Benötigte installierte Elektrolyseleistung [MW] Fall 1	Gl. 5	1.719	2.170	189	125
H <sub>2</sub> -Produktion [m <sup>3</sup> /a] für den H <sub>2</sub> -Bedarf in der Stahlproduktion, anteilig Marktanteil	Gl. 7	3.043.521.840	3.903.165.202	436.905.000	216.704.880
Benötigte installierte Elektrolyseleistung [MW] Fall 2	Gl. 8	2.278	2.921	327	162

**Tabelle 4.11:** Sensitivitätsanalyse: Bedarf der potenziell kritischen Rohstoffe Iridium und Scandium in den Elektrolyseurtechnologien PEMEL und SOEL für den Fall 1 (mit Volllaststunden nach Herstellerangaben; s. Tab. 4.3) und Fall 2 (mit Volllaststunden nach Annahme der Bundesregierung; 4.000 h) für die Wasserstoffproduktion für den stofflichen Einsatz in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland (EB 1, ca. 4,2 GW), für die Zielkapazität der Bundesregierung (2022) für das Jahr 2030 (EB 2, 10 GW) und für den maximalen Wasserstoffbedarf im Jahr 2030 in Deutschland (acatech und DECHEMA, 2022) (EB 3, 89,3 GW) im Vergleich zur Materialförderung im Jahr 2018 (\*nach Marscheider-Weidemann et al., 2021). EB=Einsatzbereich.

Elektrolyseur	Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEMEL)				Festoxid-Elektrolyse (SOEL)			
Kritischer Rohstoff	Iridium				Scandium			
Prognostizierter Bedarf [kg/MW]	0,1				0,1			
Iridium-Raffinadeproduktion im Jahr 2018 [t]*	6,8							
Scandium-Bergwerksförderung im Jahr 2018 [t]*					9,1			
Einsatzbereiche	Grundszenario EB 1		EB 2	EB 3	Grundszenario EB 1		EB 2	EB 3
	Fall 1	Fall 2			Fall 1	Fall 2		
Benötigte installierte Kapazität [MW]	2.170	2.921	5.143	45.918	189	327	571	5.102
Rohstoffbedarf [kg]	217,00	292,09	514,29	4591,84	18,90	32,70	57,14	510,20
Rohstoffbedarf anteilig an der globalen Produktion bzw. Förderung im Jahr 2018	3,2 %	4,3 %	7,6 %	67,5 %	0,2 %	0,4 %	0,6 %	5,6 %

Basierend auf den neu kalkulierten installierten Elektrolysekapazitäten für die Fälle 1 und 2 im Grundszenario (EB1) ergibt sich in der Sensitivitätsanalyse ein Iridiumbedarf für Fall 1 von ca. 217 kg und für Fall 2 von ca. 292 kg, was ca. 3,2 % und 4,3 % der globalen Iridiumförderung im Jahr 2018 (ca. 6,8 t) darstellt. Der Scandiumbedarf in Fall 1 beläuft sich in der Sensitivitätsanalyse auf ca. 18,9 kg, in Fall 2 auf ca. 32,7 kg, was ca. 0,2 % bzw. 0,4 % der globalen Förderung von Scandium im Jahr 2018 (ca. 14 t) darstellt (Tab. 4.10). Für EB2 ergibt sich ein Iridiumbedarf von ca. 514 kg, was ca. 7,6 % der globalen Iridiumförderung im Jahr 2018 darstellt, und ein Scandiumbedarf von ca. 57 kg, was ca. 0,6 % der globalen Scandiumförderung im Jahr 2018 ausmacht. Zieht man die Angabe des maximalen Wasserstoffbedarfs von 250 TWh von acatech und DECHEMA (2022a) (EB3) heran, werden für die benötigte installierte Leistung (insgesamt 89,3 GW) ca. 4,6 t Iridium, was ca. 67,5 % der globalen Iridiumförderung im Jahr 2018 darstellt, und ca. 0,5 t Scandium, was ca. 5,6 % der globalen Scandiumförderung im Jahr 2018 ausmacht, benötigt.

## 4.6 Diskussion

### 4.6.1 Wasserstoffbedarf für die Stahlindustrie in Deutschland im Jahr 2030

Die Recherche zum Wasserstoffbedarf in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland zeigt, dass die Angaben von 0,18 Mio. t/a bis 0,75 Mio. t/a (6 TWh/a bis 25 TWh/a) Wasserstoff reichen, wobei nicht immer explizit zwischen stofflichem und energetischem Bedarf unterschieden wird. Welche Gesamtmenge an Wasserstoff im Jahr 2030 tatsächlich für die Herstellung von Stahl in Deutschland benötigt wird, hängt u. a. von der Umsetzung der Umrüstung verschiedener Prozesse ab (vgl. Anhang 7.18). Für die deutschen Stahlwerke ist die Umstellung auf Wasserstoff monetär eine herausfordernde Aufgabe, einige setzen auf Subventionen der EU (Hartbrich, 2022).

Ob der Wasserstoff der Stahlproduktion aus einer kontinuierlichen heimischen Elektrolyseproduktion zur Verfügung gestellt werden wird oder ob (heimisch) gespeicherter Wasserstoff oder importierter Wasserstoff zum Einsatz kommen wird, hängt vom Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur und möglichen Kapazitäten zum Ausbau von Windkraft- und Photovoltaikanlagen ab (vgl. Husarek et al., 2021; Gils et al., 2021). Der Aufbau von Elektrolyseurtechnologien wie auch der Erneuerbaren Energien bedingt den Bedarf an kritischen Rohstoffen über Iridium und Scandium hinaus. Die Anfang Januar 2023 zwischen Deutschland und Norwegen geschlossene Vereinbarung zur Errichtung einer Pipeline für Erdgas und später Wasserstoff kann zur Verfügbarkeit von Wasserstoff in Deutschland beitragen (Stratmann, 2023).

### 4.6.2 Elektrolyseure zur Wasserstoffproduktion für die Stahlindustrie in Deutschland im Jahr 2030

Der in dieser Studie angenommene Einsatz der drei Technologien AEL, PEMEL und SOEL wird durch die tatsächliche Implementierung von Pilotprojekten in der Industrie bestätigt (vgl. Kap. 4.5.1). Die Förderung der in der Sensitivitätsanalyse mitaufgenommenen Elektrolyseurtechnologie AEMEL durch die EU (EU-Projekt CHANNEL, EU-Kommission, 2020e) und die Bundesregierung (H2GIGA-Projekt, BMBF, 2022) bekräftigt die Annahme, dass die AEMEL für den industriellen Gebrauch ebenso relevant werden kann und damit den Bedarf an potenziell kritischen Rohstoffen senken könnte.

Wie die Marktverteilung im Jahr 2030 tatsächlich sein wird, wird von verschiedenen Faktoren bestimmt. Neben der Verteilung der globalen Nachfrage nach den bzw. die Verfügbarkeit der einzelnen Elektrolyseurtechnologien (Nachfrage vs. Produktion) (IEA, 2022a) wird die weitere Entwicklung bei der Komponentenforschung (Bellini et al., 2022) die jeweils damit einhergehende Verfügbarkeit der notwendigen Rohstoffe bedingen (Bernt et al., 2019; Minke et al., 2021). Die Rohstoffverfügbarkeit wird u. a. die Herstellungskosten bestimmen (IRENA, 2020). David et al. (2019) beschreiben die AEL als geeigneter für den groß-skalierten, industriellen Einsatz mit einer direkten Verbindung zu den Erzeugungsanlagen der Erneuerbaren Energie aufgrund ihrer Marktreife. Da die PEMEL hingegen flexibler operieren kann und somit flexibler einsetzbar ist,

kann sie für Spitzenlasten genutzt werden. Der AEMEL werden eine hohe Stromdichte, Effizienz und Flexibilität zugeschrieben (Evonik, 2020).

Wie welche Elektrolyseure in Zukunft betrieben werden können, um Wasserstoff mit einem geringen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zu erzeugen, wird auch vom Aufbau und den Regulierungsmöglichkeiten des Wasserstoffnetzes und der Regelung des Stromnetzes in Deutschland und Europa abhängig sein (vgl. BMWK, 2022e). Bis zum 31.12.2022 war die Erzeugung von grünem Wasserstoff auf die ersten 5.000 Volllaststunden gemäß § 12i Abs. 1 EEG beschränkt, um eine systemdienliche<sup>17</sup> Fahrweise anzureizen. Wasserstoff, der bei Überschreitung der 5.000 Volllaststunden erzeugt wurde, galt nicht mehr als grün und war somit nicht von der EEG-Umlage befreit (§ 12i EEG i. V. m. § 69b EEG 2021). Mit dem Inkrafttreten des neuen Gesetzes zur Finanzierung der Energiewende im Stromsektor durch Zahlungen des Bundes und Erhebung von Umlagen (Energiefinanzierungsgesetz – EnFG) zum 01.01.2023 ist die Herstellung von grünem Wasserstoff nun komplett von den Umlagen befreit, § 12i EEG ist weggefallen. Der BEE (Bundesverband Erneuerbare Energie) befürchtet bei der Aufhebung der Begrenzung der Volllaststunden, dass die installierten Elektrolyseure in Deutschland die Grundlast erhöhen und folglich auch den Einsatz konventioneller Energieträger, da die Erneuerbaren nicht ausreichen (BEE, 2021).

### 4.6.3 Iridium- und Scandiumbedarf in Elektrolyseuren

Der in der vorliegenden Studie kalkulierte Iridiumbedarf für die stoffliche Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland erscheint mit 2,8 % bis 4,3 % der globalen Förderung aus dem Jahr 2018 gering. Betrachtet man jedoch die notwendige Menge für den gesamten Wasserstoffbedarf Deutschlands im gleichen Jahr, 67,5 % der Förderung aus dem Jahr 2018, wird deutlich, dass wenn Wasserstoff in Deutschland ausschließlich aus Elektrolyse zur Verfügung gestellt werden soll und weiterhin die PEMEL-Technologie einen Zuwachs erfährt, dies zu einem globalen Nachfrageüberhang beitragen kann. Auch die DERA sieht die Möglichkeit einer die Produktion übersteigenden Nachfrage und gibt für das Jahr 2040 an, dass der Iridiumbedarf je nach SSP-Szenario<sup>18</sup> zwischen 29 % (fossiler Pfad) und 515 % (Nachhaltigkeitspfad) der globalen Förderung von Iridium aus dem Jahr 2018 liegen kann (Marscheider-Weidemann et al., 2021).

Auf der Angebotsseite weist die DERA (2022) darauf hin, dass Iridium, derzeit als Beiprodukt gewonnen, abhängig von der Gewinnung von Platin und Palladium ist und eine Erhöhung einer reinen Iridiumförderung daher nicht ohne die Erhöhung der Förderung der genannten Platingruppenmetalle ausgeführt werden kann. Dass Russland derzeit der global zweitgrößte Produzent bei der Bergwerksförderung von Palladium und Platin ist, kann unter der aktuellen unsicheren geopolitischen Lage zu Herausforderungen bei der Rohstoffverfügbarkeit führen. Der Beschluss (GASP) 2022/2078 des Rates (9. Sanktionspaket der EU) verbietet neue Investitionen in den russischen Bergbausektor, schließt allerdings bestimmte kritische Rohstoffe, darunter Palladium, aber nicht Platin, aus (Rat der Europäischen Union, 2022). Auch das führende

<sup>17</sup> Systemdienliche Fahrweise ist dann gegeben, wenn der genutzte Strom aus erneuerbaren Energien stammt, d. h. wenn die Elektrolyseure betrieben werden, wenn durch erneuerbare Energien viel Strom ins Netz eingespeist werden und außerdem zu 80 % aus einer Preiszone für Deutschland und zu 20 % aus einer mit Deutschland verbundenen Preiszone stammt (BMWK, 2022e; Prognos & Sphera, 2022).

<sup>18</sup> Die SSP-Szenarien basieren auf den möglichen Zukunftsszenarien, den „Shared Socioeconomic Pathways“ (SSP), des Weltklimarats (IPCC) (O’Neill et al., 2017).

Förderland Südafrika steht weiterhin vor sozioökonomischen Herausforderungen, die jederzeit Einfluss auf die Produktion nehmen können (DERA, 2022). Als Mitglied der BRICS-Schwellenländer hält Südafrika enge Beziehung zu den Partnerländern Brasilien, Russland, Indien sowie China (bpb, 2023a). An dritter Stelle der Platin- und Palladiumproduktion steht Simbabwe, welches sich mittlerweile zu einem der 15 fragilsten Staaten der Welt entwickelt hat (FFP, 2022) und damit auch Unsicherheiten bei den Angebotsmengen aus diesem Land möglich wären.

Der global prognostizierte und über der derzeitigen Produktion liegende Iridiumbedarf wird laut IRENA (2020) Einfluss auf die Wahl der Elektrolyseurtechnologie nehmen. Minke et al. (2021) beschreiben zwei Hauptmaßnahmen, um den über die Produktion steigenden Iridiumbedarf zu drosseln: Der Materialbedarf im Katalysator muss reduziert und die EOL-RR (End-of-Life Recycling Rate) auf 90 % gebracht werden. Auch wenn die Abnutzung einzelner Komponenten einer PEMEL einen geringeren Zeitraum aufweisen kann (vgl. Tomić et al., 2023), als die Hersteller zur Lebensdauer einer kompletten Elektrolyseuranlage angeben (z. B. 20 Jahre, Siemens Energy, 2019) ist zu beachten, dass der Markthochlauf der PEMEL-Technologie zwischen den Jahren 2020 und 2040 prognostiziert wird (Minke et al., 2021). Ob folglich ein Angebot an Sekundäriridium bereits im Jahr 2030 zur Verfügung stehen kann, ist fraglich.

Für Scandium geben acatech und DECHEMA (2022) einen Bedarf zwischen 0,6 % und 0,7 % der aktuellen Förderung je benötigter GW-Elektrolyseurkapazität an, anteilmäßig an der Elektrolyseurkapazität übersteigen die kalkulierten Bedarfe dies jeweils um 0,5 %-Punkte. Der tatsächliche Bedarf an Scandium in den nächsten Jahrzehnten wird davon abhängig sein, wie sich Angebot und Nachfrage entwickeln, ein Nachfrageüberschuss ist bei erhöhter Substitution von Yttriumoxid durch Scandiumoxid möglich (DERA, 2022; Marscheider-Weidemann et al., 2021). Die DERA (2022) sieht aufgrund der Anzahl verschiedener Unternehmen Möglichkeiten, die Produktion hochzufahren. Beim Metall Scandium führt China die globale Produktion an, welches dadurch seine führende Position und Optionen nicht nur auf dem Rohstoffmarkt, sondern durch alle Abschnitte der Wertschöpfungskette deutlich machen kann (Botelho Junior et al., 2021; DERA, 2022). Auch wenn Scandium von dem Verbot neuer Investitionen in den russischen Bergbau ausgeschlossen ist (Rat der Europäischen Union, 2022), kann der Krieg zwischen den beiden Förderländern Russland und Ukraine Einfluss auf das Angebot für den Weltmarkt nehmen.

Aufgrund der prognostizierten globalen Nachfrageüberhänge nach Iridium und Scandium stellt die Deckung des Rohstoffbedarfs ohne einen direkten Lagerstätten- oder Raffinationszugang eine Herausforderung dar. Auch wenn jetzt neue Lagerstätten erschlossen würden, unter Berücksichtigung einer Vorlaufzeit von zehn bis 15 Jahren bei Greenfield Exploration würde eine eigene Bedarfsdeckung für das Jahr 2030 nicht möglich sein. Beteiligungen an bestehenden Projekten oder das Vorhalten von energieintensiver Verhüttung und Raffination, bei der aus Primär- und Sekundärmetallen die kritischen Metalle als Beiprodukt, z. B. Platingruppenmetalle bei der Raffination von Trägermetallen wie Kupfer oder Nickel (Reuter und Kojo 2012) gewonnen werden können, stellen eine Möglichkeit dar, die eigene Nachfrage zu bedienen.

## 4.7 Schlussfolgerung

Für die Erzeugung von 0,68 Mio. t Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland ist je nach Volllaststundenannahme die Errichtung zwischen 4,2 GW und 5,6 GW Elektrolyseleistung notwendig. Für den Bau von 55 % dieser Leistung ist der Einsatz der potenziell kritischen Rohstoffe Iridium (in PEMEL) und Scandium (in SOEL) erforderlich. Mit einem Anteil zwischen 2,8 % und 4,3 % an der globalen Iridiumförderung von 2018 ist der kalkulierte Iridiumbedarf wesentlich signifikanter als der Scandiumbedarf, welcher sich zwischen 0,2 % und 0,6 % bewegt. Für die Errichtung von 89,3 GW Elektrolysekapazitäten, um den gesamten Wasserstoffbedarf Deutschlands im Jahr 2030 decken zu können, beträgt der Anteil an der globalen Förderung 67,5 % für Iridium und 5,6 % für Scandium.

Eine hohe Kapazität der PEMEL-Technologie für die Wasserstoffproduktion zur Deckung des Bedarfs in Deutschland kann sich insbesondere für Iridium, das als Begleitelement von Platin- und Palladiumlagerstätten gewonnen wird, zu einem Verfügbarkeitsproblem entwickeln. Vor dem Hintergrund, dass auch andere Länder einen wachsenden Bedarf an Technologiemetallen entwickeln und dass bei einem Fortschreiten der gegenwärtigen geopolitischen Auseinandersetzungen der Zugang zu den großen Bergwerksförderländern Russland und ggf. Südafrika weiter eingeschränkt wird, sind Maßnahmen zur Sicherung von Lieferketten essenziell. Der Einsatz der SOEL-Technologie in Deutschland wird die heimische Nachfrage nach dem potenziell kritischen Metall Scandium weiter erhöhen, was derzeit nur als Beiprodukt bei der Raffination von verschiedenen Erzen aus China, Russland und der Ukraine gewonnen wird. Die erwarteten Marktanteile für das Jahr 2030 zwischen 45 % und 51 % für die PEMEL und zwischen 6 % und 10 % für die SOEL könnten durch neue Technologien wie den Ausbau des industriellen Einsatzes der AEMEL-Technologie, die keinen Bedarf an derzeit potenziell kritischen Rohstoffen hat, reduziert werden.

Unter den gegebenen Bedingungen wird die Rohstoff-Importabhängigkeit Deutschlands weiter steigen. Neben alternativen Technologien werden Effizienzsteigerungen im Materialverbrauch und die Etablierung von Recyclingverfahren den Rohstoffbedarf senken, aber den wachsenden Bedarf der potenziell kritischen Rohstoffe Iridium und Scandium nicht vermeiden. Entsprechend sind Handlungsmaßnahmen insbesondere zur Sicherung von Lieferketten für Iridium sinnvoll.

## **5. Bedarf Seltene Erden Elemente (Ny, Pr, Dy, Tb) für Windkraftanlagen zur Energiegewinnung für die Herstellung von Elektrolyse-Wasserstoff im Jahr 2030 in Deutschland**

### **5.1 Zusammenfassung**

Die Bundesregierung hat im „Handlungskonzept Stahl“ aus dem Jahr 2020 festgeschrieben, dass die Stahlproduktion in Deutschland zu halten, zukunftsfähig und klimafreundlich zu gestalten ist. Die Stahlproduktion soll durch die Umrüstung der Primärproduktion hin zu einer Direktreduktion mit Wasserstoff beispielsweise als Reduktionsmittel dekarbonisiert werden. Damit der durch die Wasserelektrolyse produzierte Wasserstoff auch als grün und emissionsfrei bezeichnet werden kann, müssen die Elektrolyseure mit Strom aus Erneuerbaren Energien gespeist werden. In Kapitel 4 wurde die Elektrolyseurkapazität berechnet, die für die Produktion von 0,68 Mio. t Wasserstoff für die stoffliche Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland notwendig sein wird. Die vorliegende Studie berechnet die notwendige Energie für die Elektrolyseure mit ca. 36,5 TWh und legt Windkraft als Energiequelle fest. Für die zu installierenden Windkraftanlagen (WKA) wurde der Bedarf an Seltene Erden Elementen berechnet.

Basierend auf der tatsächlich installierten Leistung von und der tatsächlichen Erzeugung aus Windkraft in den Jahren 2015 bis 2021 werden sieben Modelljahre für die Windkrafterzeugung im Jahr 2030 berechnet. Dabei werden Defizit- und Überschussperioden ermittelt, die aufzeigen, dass nicht zu jedem Zeitpunkt (in Viertelstunden gemessen) ausreichend grüner Strom für die Elektrolyseure bereitgestellt werden kann, auch wenn so viel Windkraftleistung installiert ist, um aufsummiert über ein Jahr hinweg die benötigte Energie zu erzeugen. Die längste Defizitperiode der sieben Modelljahre wird mit 25.380 Minuten (ca. 17,6 Tage) berechnet, in der ca. 0,99 TWh weniger Strom für die Elektrolyseure erzeugt werden kann, als benötigt würde. Die längste Überschussperiode wird mit 23.715 Minuten (ca. 16,5 Tage) und ca. 2,2 TWh mehr Erzeugung als notwendig berechnet.

Der Bedarf der potenziell kritischen Rohstoffe Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium (Seltene Erden Elemente), welche in den Magneten der Antriebstechnologien von WKAs verbaut werden, beträgt basierend auf der modellierten zu installierenden WKA-Leistung in dieser Studie zwischen 821,5 t und 1050,2 t an Neodym, zwischen 168,2 t und 215,8 t an Praseodym, zwischen 174,8 t und 231,7 t an Dysprosium und zwischen 30,6 t und 39,0 t an Terbium.

## 5.2 Einführung

Die Wirtschaftsvereinigung Stahl schätzt den Wasserstoffbedarf für die Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland auf 0,66 Mio. t, was für die Umstellung eines Drittels der Produktion ausreichen wird (WV Stahl, 2020). Weitere Studien gehen von einem Bedarf zwischen 0,18 Mio. t (für den allgemeinen Bedarf im Jahr 2030 in der Stahlindustrie; Hebling et al., 2019) und 1,68 Mio. t (für die komplette Umstellung der Primärrouten; Neuwirth et al., 2022) aus (vgl. Kap. 4). Laut der Bundesregierung (2020) ist nur der Einsatz von grünem Wasserstoff nachhaltig.<sup>19</sup> Gem. § 3 Nr. 27a EEG 2023 sollte dieser elektrochemisch mit Strom aus Erneuerbaren Energien gemäß § 3 Nr. 21 EEG 2023 produziert werden.

Unterschiedliche Studien untersuchten den Bedarf an potenziell kritischen Rohstoffen, besonders Metallen. Für die Energie- und Verkehrswende beispielsweise untersuchte das Wuppertal Institut (2014), welche kritischen Rohstoffe für die Produktion von Erneuerbaren Energien und Kraftstoffen bis zum Jahr 2050 in Deutschland von Bedeutung sind. Falkenberg et al. (2019) schätzen die Rohstoffbedarfe für Energieerzeugungsanlagen sowie Energiespeicher für das Jahr 2030 in Deutschland. Gegenwärtig werden für Windkraftanlagen (WKAs) zwischen 400 und 500 t/MW an Rohstoffen benötigt u. a. Stahl für den Turm, Kupfer in Generatoren und Leitungen, Seltene Erden Elemente für die Generatoren oder Beton für das Fundament (Hilgers und Becker, 2020). In der Fachliteratur wird von potenziell kritischen Rohstoffen gesprochen, weil aus geologischer Sicht kein Rohstoffmangel existiert, sondern ein Mangel an Verfügbarkeit auftreten kann (DERA, 2014). Dieser ist bedingt durch verschiedene Faktoren wie den Explorations- und Abbaumöglichkeiten, der sozioökonomischen Situation in den Abbau- und Weiterverarbeitungsändern und der Nachfrage auf dem globalen Markt (vgl. DERA, 2021). Durch neue Technologien und Marktmechanismen können sich zuvor unbekannte (Geopotential) oder bekannte, unökonomische Vorkommen (Ressourcen) zu ökonomisch abbaubaren Lagerstätten (Reserven) entwickeln (Wellmer, 2008; Hilgers et al., 2021). Auch das Recycling trägt bei einigen Rohstoffen zum Angebot bei, sofern dem Recycling keine technischen, ökonomischen und ökologischen Gründe entgegenstehen (Schäfer und Schmidt, 2020).

Veranlasst durch die Umstellung von emissionsintensiven Prozessen in der Stahlproduktion (im Jahr 2020 wurden ca. 48 Mio. t CO<sub>2</sub>äquiv. emittiert, DESTATIS, 2022e) hin zu einer Nutzung von Wasserstoff wird in dieser Studie ermittelt, wie viel installierte Windkraft-Leistung bereitgestellt werden muss, um den Energiebedarf von Elektrolyseuren zur Erzeugung von 0,68 t Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland (s. Kap. 4) decken zu können. Daraus wird abgeleitet, wie viele Seltene Erden Elemente benötigt werden und welchen Anteil dies an der Jahresproduktion an Seltenen Erdoxiden im Jahr 2018 ausmachen würde.

---

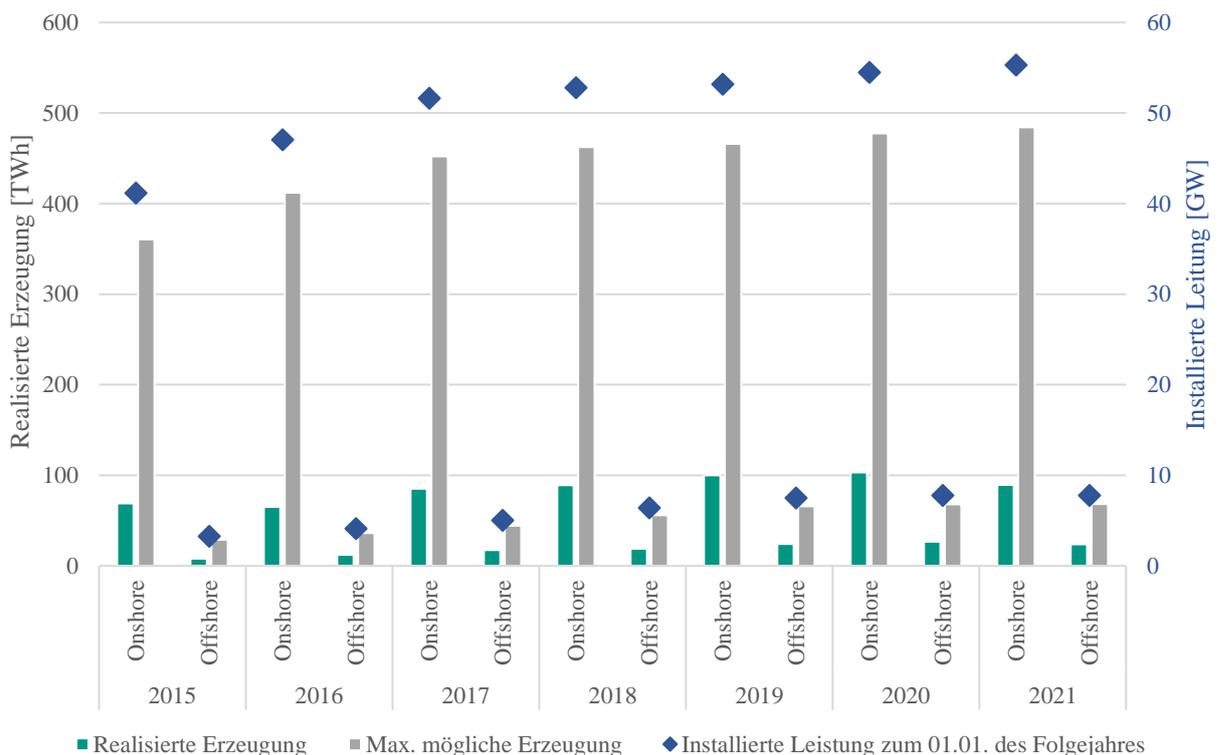
<sup>19</sup> § 93 EEG Abs.1 Die Bundesregierung wird ermächtigt, durch Rechtsverordnung ohne Zustimmung des Bundesrates die Anforderungen an die Herstellung von Grünem Wasserstoff zu bestimmen, um sicherzustellen, dass nur Wasserstoff als Grüner Wasserstoff gilt, der ausschließlich mit Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt wurde und der mit dem Ziel einer nachhaltigen Entwicklung der Energieversorgung vereinbar ist. Hierbei ist vorzusehen, dass für die Herstellung des Wasserstoffs nur Strom aus erneuerbaren Energien verbraucht werden darf, der keine finanzielle Förderung nach diesem Gesetz in Anspruch genommen hat. [...]. Vor dem 01.01.2023 galt § 12i EEG i. V. m. § 3 Nr. 21 EEG 2021.

## 5.3 Ausgangslage

### 5.3.1 Strom aus Erneuerbaren Energien

In Stromsystemen richtet sich das Angebot (Erzeugung) basierend auf der Versorgung durch konventionelle Kraftwerke nach der Nachfrage (Last) (Wawer, 2022). Die Erzeugung von Strom aus Windkraftanlagen (WKA) und Photovoltaik (PV) richtet sich nicht nach der Last, sondern nach meteorologischen Gegebenheiten, umweltbezogenen Faktoren sowie dem gegebenen Tag-Nacht-Wechsel. WK- und PV-Anlagen speisen folglich dargebotsabhängig Strom ins Netz ein (Bundesnetzagentur, 2021) und benötigen weitere flexible Kraftwerke (bislang Erdgas) oder ausreichend dimensionierte Großspeicher (Abb. 5.1).

In den Jahren 2015 bis 2021 lag der durchschnittliche jährliche Nutzungsgrad von Onshore-Anlagen bei 19,2 %, der von Offshore-Anlagen bei ca. 35,2 % (berechnet nach Bundesnetzagentur, 2022).<sup>20</sup> Im Jahr 2021 lag der Nutzungsgrad der On- und Offshore-Anlagen mit 18,5 % und 35,2 % niedriger als in den zwei Jahren zuvor. Die Jahre 2016 mit einem Nutzungsgrad von 15,8 % Onshore und 2015 mit einem Nutzungsgrad von 28,3 % Offshore stellen die Jahre mit den jeweils niedrigsten Werten dar.



**Abbildung 5.1:** Realisierte Erzeugung (TWh), installierte Leistung zum 01.01. des Folgejahres (GW) und maximal mögliche Erzeugung (TWh) in den Jahren 2015 bis 2021 (nach Bundesnetzagentur, 2022).

<sup>20</sup> Installierte Leistung zum Jahresbeginn des Folgejahres ÷ Realisierte Erzeugung = Volllaststunden. Volllaststunden ÷ 8.760 h (oder 8.784 h im Schaltjahr) = Nutzungsgrad.

Die fluktuierende Stromerzeugung von WKAs und PVs nimmt mit dem Ausbau dieser Technologien eine immer größere Bedeutung ein. Die nachgefragte Last abzüglich der Stromerzeugung aus Windkraft zu Land und zu See sowie Photovoltaik wird als Residuallast bezeichnet (BDEW, 2021; Bundesnetzagentur, 2022). Eine negative Residuallast entsteht bei einer Stromerzeugung aus Windkraft und PV, die die Last übersteigt (Wawer, 2022). Folglich müssen die Schwankungen durch flexible Technologien ausgeglichen werden (Schwarz und Pfeiffer, 2018). Optionen zur Steigerung der Flexibilität bei einer negativen Residuallast (Überschussstrom) sind Kurzzeitspeicher wie Pump- und Druckluftspeicher oder Langzeitspeicherlösungen wie Power-to-Heat, Power-to-Gas, H<sub>2</sub>-Produktion, Stromexporte (BMWK, 2022c; Schwarz und Pfeiffer, 2018).

Eine positive Residuallast muss durch flexible Gaskraftwerke, Steinkohle-betriebene Dampfkraftwerke, die nur schwer anzufahrenden und daher i. d. R. im Dauerbetrieb laufenden Braunkohle- und Kernenergie-Kraftwerke geregelt werden (Wawer, 2021; Schwarz und Pfeiffer, 2018). Für ein stabiles Stromsystem muss zu jeder Zeit der Last eine verfügbare Leistung bereitgestellt werden (Bundesnetzagentur, 2022).<sup>21</sup> Da die Bereitstellung gesicherter Leistung<sup>22</sup> durch Erneuerbare Energie, der Leistungskredit, begrenzt ist, muss die Regelenergie<sup>23</sup> auftretende Schwankungen kurzfristig zur Gewährung der Netzstabilität ausgleichen (Wawer, 2022).

Seit Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG 2000) hat Strom erzeugt aus Erneuerbaren Energien einen Einspeisevorrang (§ 11 EEG 2023). Über das Einspeisemanagement kann aber auch die Reduzierung (Abregelung) der Einspeisung von Strom aus Erneuerbaren Energien sowie Kraft-Wärme-Kopplung- und Grubengasanlagen in das Stromnetz durch die Netzbetreiber erfolgen (Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt, 2022; § 13 EnWG ff.). Dies geschieht dann, wenn andere Maßnahmen, insbesondere die Abregelung von konventionellen Kraftwerken, nicht zum Ausgleich der temporär überlasteten Übertragungsnetze ausreichen (Bundesnetzagentur, 2018). In den Jahren 2015 bis 2021 lag die jährliche Ausfallarbeit<sup>24</sup> von Windenergie an Land bei ca. 4,8 % und auf See bei 4,7 % der realisierten Erzeugung des jeweiligen Jahres (Abb. 5.2; eigene Berechnung nach Bundesnetzagentur, 2022 und Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt, 2022). Laut Bundesnetzagentur und dem Bundeskartellamt (2022) ist die Höhe der Ausfallarbeit ein Indiz dafür, dass „Maßnahmen zur Optimierung, Verstärkung und dem Ausbau der Netze“ dringend notwendig sind.

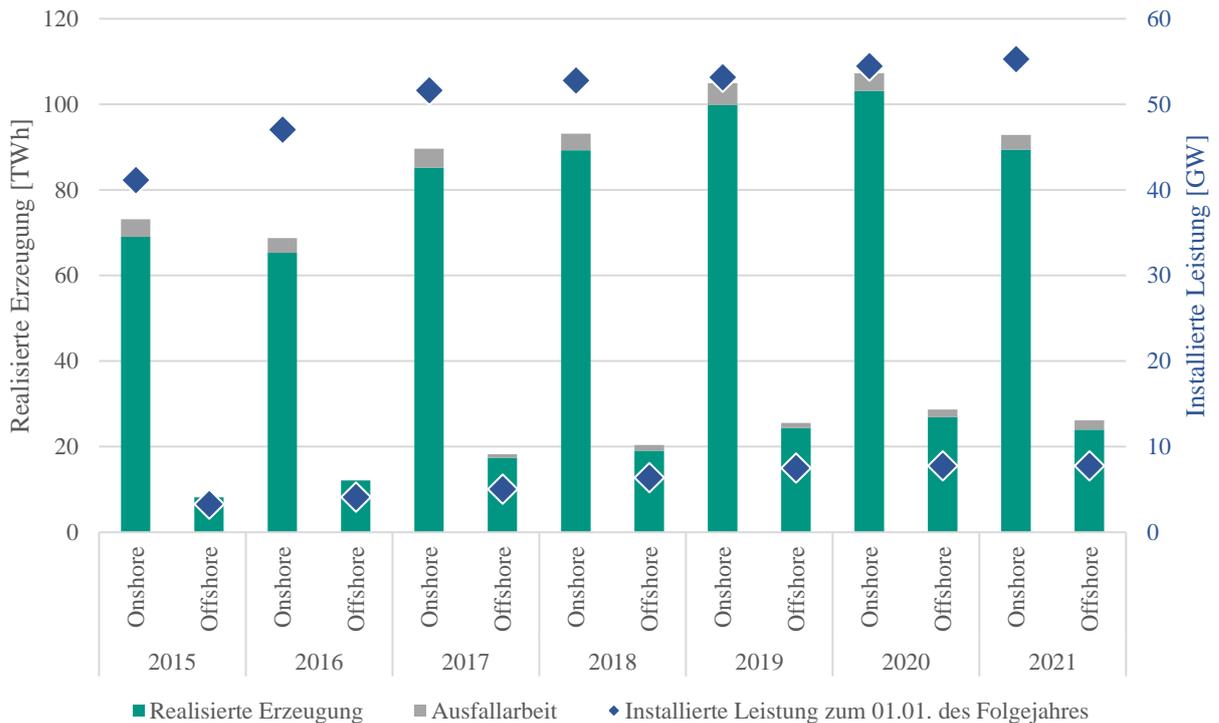
---

<sup>21</sup> Internationaler Begriff: Generation Adequacy (Übertragungsnetzbetreiber, 2020).

<sup>22</sup> Gesicherte Leistung: Verfügbare Leistung abzüglich der Reserve für Systemdienstleistungen ist die für die Versorgung der Last sicher zur Verfügung stehende Leistung (Übertragungsnetzbetreiber, 2020). Die installierte Leistung im Gebiet ist die verfügbare Leistung zusammen mit der nicht verfügbaren Leistung (Systemdienstleistungen, geplante Revisionen, ungeplante Ausfälle und fluktuierende erneuerbare Erzeugung) (Übertragungsnetzbetreiber, 2020; Wawer, 2022).

<sup>23</sup> Regelenergie: Durch Reservierung von Kapazitäten (Regelleistung) kann von den Netzbetreibern zentral das Regelzonenungleichgewicht ausgeglichen werden (Regelarbeit) (Wawer, 2022).

<sup>24</sup> Ausfallarbeit: Die verpasste Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien durch die Abregelung dieser (oder auch KWK- und Grubengas) (Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt, 2022).



**Abbildung 5.2:** Windenergie in Deutschland: Realisierte Erzeugung, Ausfallarbeit und installierte Leistung in den Jahren 2015 bis 2021. Die installierte Leistung ist die Leistung, die potenziell in GW erbracht werden könnte. Die realisierte Erzeugung ist die Energie, die tatsächlich erbracht wurde (TWh) (nach Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt, 2022).

### 5.3.2 Seltene Erden Elemente (SEE)

Zu den Seltene Erden Elementen (SEE) gehören 15 Metalle. Sie werden in leichte und schwere SEE unterteilt. Beide Gruppen stehen auf der Liste der kritischen Rohstoffe der EU (EU-Kommission, 2020a). Neodym und Praseodym sind den leichten SEE und Dysprosium und Terbium den schweren SEE zugeordnet. Die SEE kommen in der Erdkruste vor allem in Silikaten, Oxiden, Karbonaten oder Phosphaten vor. Sie werden als Beiprodukte beim Abbau von beispielsweise Eisenerz gewonnen. Innerhalb von zehn Jahren stieg die Produktion von SEE um das 2,5-fache von 111 kt im Jahr 2011 auf ca. 277,1 kt im Jahr 2021 (Abb. 5.3), wobei China ca. 168 kt und die USA ca. 43 kt gefördert haben (Abb. 5.4) (USGS, 2012, 2022). Die Aufbereitung findet zum größten Teil in China und zu geringen Mengen in Malaysia statt (BGR, 2021a). Zwischen den Jahren 2004 und 2015 hatte China Exportrestriktionen für SEE verhängt, was den globalen Markt beeinflusste (DERA, 2021c).

Die Anwendungsgebiete von SEE sind vielfältig, sie werden in Legierungen beispielsweise in Magneten, in Katalysatoren, bei der Glas- und Keramikherstellung, in der Elektronik oder auch der Photonik eingesetzt (Bünzli und McGill, 2018). Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium werden in Zukunft vor allem in Permanentmagneten in Motoren für E-Fahrzeuge und Windturbinen verwendet (Bobba et al., 2020). Talens Peiro et al. (2018) beschreiben eine derzeitige EOL-RIR (End-of-Life Recycling Input Rate) für Neodym von ca. 1 %, für Praseodym von ca. 10 %, für Dysprosium von ca. 0 % und für Terbium von ca. 22 %.

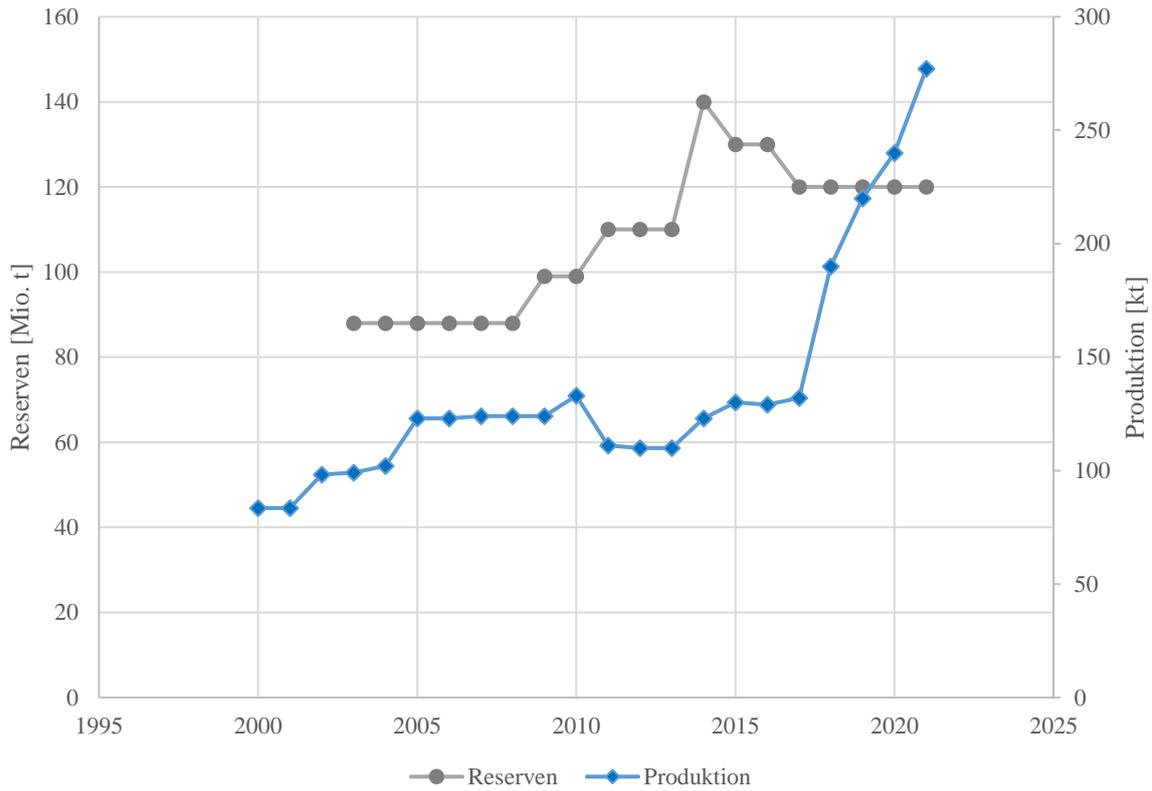


Abbildung 5.3: Seltene Erden Elemente-Minenproduktion und Reserven gemessen in Seltene Erden Oxide (nach USGS, 2001–2022).

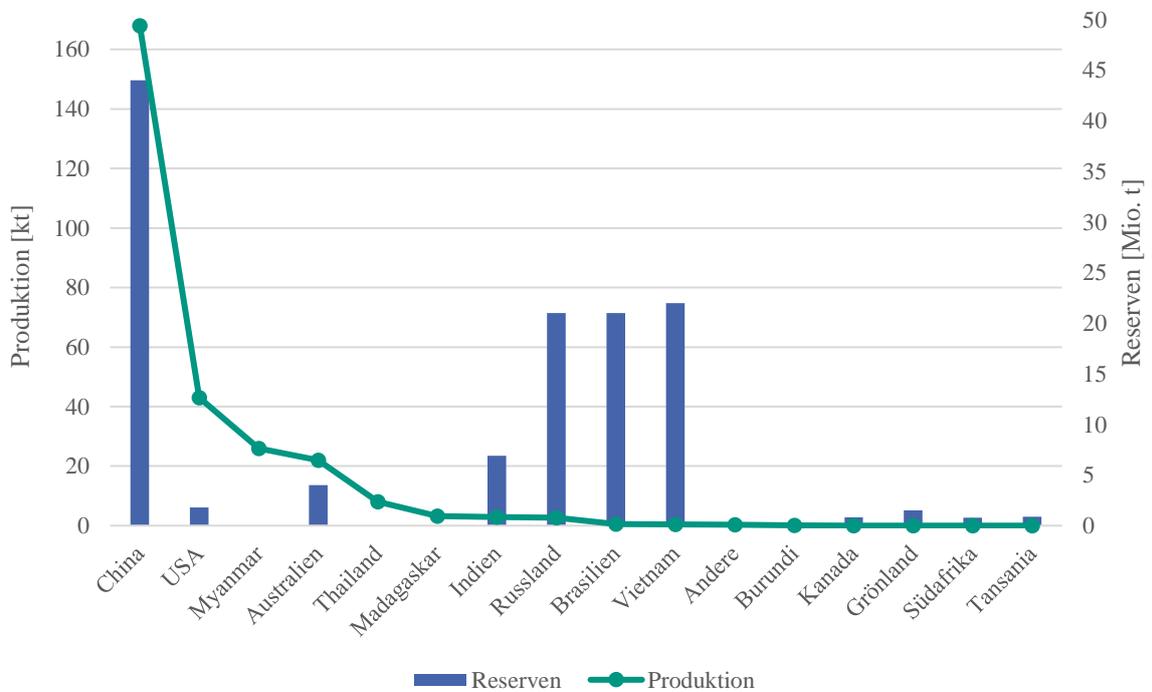


Abbildung 5.4: Seltene Erden Elemente-Minenproduktion und Reserven nach Ländern im Jahr 2021 gemessen in Seltene Erden Oxide (nach USGS, 2022).



Die kalkulierte installierte Leistung wird dann verwendet, um den Nutzungsgrad der On- und Offshore-Windkraftanlagen je Viertelstunde (Gl. 6) und die Volllaststunden (Gl. 7) jeweils für das Bezugsjahr zu bestimmen.

$$\begin{aligned} \text{Realisierte Erzeugung}_n \text{ [MWh]} &\div (\text{Installierte Leistung}_a \text{ [MW]} \times 0,25 \text{ [h]}) \\ &= \text{Nutzungsgrad}_n \text{ [\%]} \text{ (alle Komponenten je Viertelstunde)} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Realisierte Erzeugung}_n \text{ [MWh]} &\div \text{Installierte Leistung zum } 01.01._{n+1} \text{ [MW]} \\ &= \text{Volllaststunden}_n \text{ [h]} \end{aligned} \quad (7)$$

Durch die ermittelten Volllaststunden je Bezugsjahr (Gl. 7) und dem kalkulierten Gesamtenergiebedarf der Elektrolyseure (Gl. 2) wird die notwendige zu installierende Leistung berechnet (Gl. 8). Durch Anwendung des Nutzungsgrads (Gl. 6) auf die berechnete zu installierende Leistung (Gl. 8) kann die Energieerzeugung je modelliertem Bezugsjahr bestimmt werden (Gl. 9).

$$\begin{aligned} \text{Volllaststunden}_n \text{ [h]} &\div \text{Energiebedarf der Elektrolyseure [MWh]} \\ &= \text{benötigte installierte Leistung}_n \text{ [MW]} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{Nutzungsgrad}_n \text{ [\%]} &\times \text{benötigte installierte Leistung}_n \text{ [MW]} \\ &= \text{Erzeugung}_n^* \text{ [MW]} \text{ (alle Komponenten je Viertelstunde)} \end{aligned} \quad (9)$$

Beruhend auf den durchgeführten Berechnungen wird kalkuliert, ob es sich bei der modellierten Erzeugung je Viertelstunde (Gl. 9) um ein Energieerzeugungsdefizit oder einen -überschuss handelt (Gl. 10) und wie lange die Dauer (in Minuten) der jeweiligen Periode ist (Gl. 11). Als Defizitperiode wird die Dauer bezeichnet, in der die Energieerzeugung (gemessen in MW/Viertelstunde) unterhalb des für die Elektrolyseure benötigten Energiebedarfs (MW/Viertelstunde) liegt. Eine Überschussperiode stellt entsprechend die Dauer dar, in der die Energieerzeugung oberhalb des benötigten Energiebedarfs liegt. Dabei wird auch die Höhe der fehlenden oder überschüssigen Energie (MWh) ermittelt. Dies wird für jedes Bezugsjahr durchgeführt.

$$\text{Erzeugung}_n \text{ [MW]} - \text{benötigte Erzeugung} = \text{Differenz [MW]} \text{ (je Viertelstunde)} \quad (10)$$

$$\text{Ende Periode} - \text{Beginn Periode} = \text{Dauer der Periode} \quad (11)$$

Aufbauend auf der Modellierung zur installierten Leistung an WKAs (Gl. 8) wird der Bedarf an SEE für die benötigten WKAs für das Jahr 2030 in Kapitel 5.5.4 berechnet. Um von ganzen Anlagen auszugehen, wird die zu installierende WKA-Leistung (Gl. 8) herangezogen und ermittelt, wie viele der Beispielanlagen, die in Kap. 5.5.2 für Onshore- und Offshore-WKAs bestimmt wurden, notwendig wären, um die notwendige Energie zu generieren. Der Ersatz existierender und zu erneuernder WKAs wird nicht berücksichtigt. Rohstoffbedarfe für die Infrastruktur zum Transport von Strom sowie die zur möglichen Speicherung von Wasserstoff werden ebenfalls nicht berücksichtigt.

## 5.5 Ergebnisse

### 5.5.1 Berechnung Energiebedarf

Der Energiebedarf für die Elektrolyseure, die 0,68 Mio. t Wasserstoff für die stoffliche Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland erzeugen sollen (Kapitel 4; Albrecht et al., 2022), beträgt in einem Jahr ca. 36,48 TWh (Gl. 2) und in einem Schaltjahr ca. 36,58 TWh (Summe des Energiebedarfs der drei Elektrolyseurtechnologien; Tab. 5.1).

**Tabelle 5.1:** Berechnung des Energiebedarfs je Elektrolyseurtechnologie für die Wasserstoffproduktion für die stoffliche Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland (s. Kap. 4).

Elektrolyseurtechnologie		Alkalische Elektrolyse (AEL)	Proton-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEMEL)	Festoxid-Elektrolyse (SOEL)
Modell		HYLINK Alkaline (sunfire GmbH)	Silyzer 300, 24 Modules (Siemens Energy)	HYLINK SOEC (sunfire GmbH)
H <sub>2</sub> -Produktion [m <sup>3</sup> /a] einer Anlage	Kap. 4	18.558.060	31.477.139	6.241.500
Anzahl benötigter Elektrolyseure (aufgerundet)		184	109	122
Benötigte installierte Elektrolyseleistung [MW] Fall 1 (Volllaststunden je nach Herstellerangaben)		1.929	1.908	329
H <sub>2</sub> -Produktion [m <sup>3</sup> /a] für den H <sub>2</sub> -Bedarf in der Stahlproduktion, anteilig Marktanteil		3.414.683.040	3.431.008.121	761.463.000
Benötigte installierte Elektrolyseleistung [MW] Fall 2 (Volllaststunden nach Annahme Bundesregierung; 4.000 h)		2.555	2.568	570
Energiebedarf [MWh/a]	Gl. 1	16.893.695	16.709.700	2.885.544
Energiebedarf [MWh/a] (Schaltjahr)	Gl. 1	16.939.979	16.755.480	2.893.450

### 5.5.2 Annahmen zur Energieerzeugung aus Windkraftanlagen

Seit 2003 trägt die Windenergie den größten Anteil zur Bruttostromerzeugung aus Erneuerbaren Energien bei (2003: 3,1 %; 2021: 20,1 %; BMWK, 2022). In Deutschland sind verschiedene Pilot-Projekte in der Umsetzung, welche darauf abzielen, die Elektrolyseure zur Wasserstoffherzeugung direkt mit Windkraftanlagen zu koppeln (vgl. Windwasserstoff Salzgitter, Salzgitter AG, 2022; H2Mare, Fraunhofer IWES, 2021; H2ORIZON, DLR, 2018). Es wird angenommen, dass die Elektrolyseure ausschließlich mit Strom aus Windkraftanlagen gespeist werden. Entsprechend der Zielkapazitäten der Bundesregierung von Windkraft an Land und auf See für das Jahr 2030 (115 GW und 30 GW; Bundesregierung, 2022) wird ein Verhältnis für den Energiebedarf der Elektrolyseure von 79,3 % aus Onshore- und 20,7 % aus Offshore-WKAs angenommen.

Laut des Branchenportals Windbranche.de hat die Enercon GmbH den größten Marktanteil an Onshore-WKA in Deutschland, mit 12.355 Enercon-Anlagen und einer Leistung von insgesamt ca. 24.316 MW (ca. 44 %, Stand November 2022; IWR, 2022). Der Offshore-Marktführer in Deutschland ist Siemens Gamesa (ehemals Siemens Wind Power GmbH & Co. KG), mit 936 installierten Siemens-Anlagen mit einer Gesamtleistung von ca. 4.525 MW (ca. 58 %, Stand November 2022; IWR, 2022). Daher werden für das Jahr 2030 exemplarisch die aktuell verfügbaren leistungsstärksten Modelle dieser beiden Marktführer herangezogen. Von Enercon das Modell E-172 EP5 mit einer Nennleistung von 6 MW, von Siemens Gamesa das Modell SG 14-222 DD mit einer Nennleistung von 14 MW (Tab. 5.2, Enercon, 2022; Siemens Gamesa, 2022). Beide Technologien haben einen Direktantrieb, welcher mit Permanentmagneten ausgestattet ist (Enercon, 2019; Siemens Gamesa, 2022). Für Enercon ist die EP-5 Technologie ihre erste, die Permanentmagneten verwendet (Enercon, 2019).

**Tabelle 5.2:** Für die Studie herangezogene Windkraftanlagen.

Windkraft	Hersteller	Anlage	Leistung
Onshore	Enercon	E-172 EP5	6 MW
Offshore	Siemens Gamesa	SG 14-222 DD	14 MW

Transmissionsanlagen sowie die Infrastruktur für Transport und Speicherung des Stroms werden nicht berücksichtigt (Tab. 5.3). Dies ist darin begründet, dass noch nicht feststeht, wie sich die Infrastruktur sowie die Speichermöglichkeiten von Strom (speziell für den Einsatz in Elektrolyseuren) aus Windkraft in Deutschland gestalten und etablieren werden.

**Tabelle 5.3:** Annahmeübersicht für die Berechnung des Bedarfs an kritischen Rohstoffen und Energie.

Annahme		2030
1	Energiebedarf	ca. 36,48 TWh (ca. 36,58 TWh im Schaltjahr)
2	Energiequelle	Windkraft, Onshore und Offshore
3	Infrastruktur	wird nicht berücksichtigt

### 5.5.3 Modellierung und Berechnung der Energieerzeugung durch Windkraft

Die neu installierte Leistung über das jeweilige Jahr hinweg (Gl. 3) lag Onshore zwischen 5.874 MW im Jahr 2015 und 790 MW im Jahr 2021, Offshore zwischen 2.290 MW im Jahr 2015 und 13 MW im Jahr 2021 (Tab. 5.4). Daraus ergibt sich ein durchschnittlicher täglicher Zuwachs (Gl. 4) in den Jahren 2015 bis 2021 zwischen 9,5 MW und 2,2 MW Onshore und zwischen 6,27 MW und 0,04 MW Offshore (Tab. 5.4, digitaler Anhang). Der tatsächliche Nutzungsgrad der WKAs lag durchschnittlich über die Jahre 2015 bis 2021 für Onshore-WKAs bei 20,5 % und für Offshore-WKAs bei 39,2 % (Tab. 5.5). Der Nutzungsgrad je Viertelstunde (Gl. 6) wird für die weitere Berechnung der möglichen Erzeugung je Viertelstunde (Gl. 9) im Jahr 2030 berücksichtigt.

**Tabelle 5.4:** Durchschnittlicher Zuwachs an installierter Leistung pro Tag im jeweiligen Jahr (nach Bundesnetzagentur, 2022).

Datensatz	Wind	2022	2021	2020*	2019	2018	2017	2016*	2015
Installierte Leistung [MW] (gesamt, zum 01.01.)	Onshore	55.289	54.499	53.184	52.792	51.633	47.042	41.168	37.701
	Offshore	7.787	7.774	7.504	6.393	5.051	4.131	3.283	993
Installierte Leistung im Jahr [MW]	Onshore		790	1.315	392	1.159	4.591	5.874	3.467
	Offshore		13	270	1.111	1.342	920	848	2.290
Zuwachs pro Tag [MW]	Onshore		2,2	3,6	1,1	3,2	12,6	16,0	9,5
	Offshore		0,04	0,74	3,04	3,68	2,52	2,32	6,27

Die kalkulierten durchschnittlichen Volllaststunden der Bezugsjahre 2015 bis 2021 liegen Onshore bei 1.685 h und Offshore bei 3.090 h (Tab. 5.5). Die benötigte installierte Leistung (Gl. 8) zur Energieerzeugung für die Elektrolyseure liegt im Durchschnitt der Bezugsjahre Onshore bei 17.337 MW und Offshore bei 2.471 MW (Tab. 5.5). Die geringste zu installierende Leistung liegt Onshore bei 15.296 MW und Offshore bei 2.183 MW (Tab. 5.5). Die größte zu installierende Leistung liegt Onshore in der Modellierung des Jahres 2016 mit 20.855 MW und Offshore in der Modellierung des Jahres 2015 mit 3.045 MW (Tab. 5.5). Die berechneten Jahreserzeugungen (basierend auf Gl. 9) an Windenergie liegen durchschnittlich bei 39,3 TWh (Tab. 5.5). Die modellierten Erzeugungen je Viertelstunde (Gl. 9) je Bezugsjahr sind dem digitalen Anhang zu entnehmen.

Tabelle 5.6 führt die Anzahl der Defizit- und Überschussperioden, die Dauer in Minuten (Gl. 11) und die Höhe der Leistung (MW) auf. Durchschnittlich gibt es 160 Defizitperioden und 161 Überschussperioden in der Modellierung der Energieerzeugung je Bezugsjahr. Die gesamte Defizitdauer pro Jahr (alle Defizitperioden aufsummiert) ist im Bezugsjahr 2021 mit 318.255 Minuten am höchsten. Das höchste kumulierte Defizit liegt mit 11,1 TWh ebenfalls im Bezugsjahr 2021. Die Defizitperiode mit dem höchsten Erzeugungsdefizit liegt in der Modellierung im Bezugsjahr 2018 und weist 1,09 TWh über einen Zeitraum von 24.420 Minuten (ca. 17 Tage) auf (Worst-Case-MWh). Die längste Defizitperiode im betrachteten Zeitraum dauert 25.380 Minuten (ca. 17,6 Tage) mit einem Defizit von ca. 0,99 TWh und liegt im Bezugsjahr 2021 (Worst-Case-Minuten). Die gesamte Überschussdauer ist im Bezugsjahr 2015 mit 257.670 Minuten am höchsten. Der höchste kumulierte Überschuss liegt mit ca. 18,5 TWh ebenfalls im Bezugsjahr 2015. Die Überschussperiode mit dem höchsten Erzeugungsüberschuss liegt in der Modellierung im Bezugsjahr 2019, sie weist ca. 2,2 TWh über einen Zeitraum von 23.715 Minuten (ca. 16,5 Tage) auf (Best-Case-MWh). Dies ist ebenfalls die längste Überschussperiode (Best-Case-Minuten). Die modellierten Defizit- und Überschussperioden aller Bezugsjahre sind graphisch nach modellierter Erzeugung (MWh) und Dauer (Minuten) im Anhang 7.20 in den Abbildungen 7.5–7.18 dargestellt. Die Berechnung der Differenz (entweder Defizit oder Überschuss) der modellierten zur benötigten Erzeugung je Viertelstunde (Gl. 10) ist ebenfalls dem digitalen Anhang zu entnehmen.

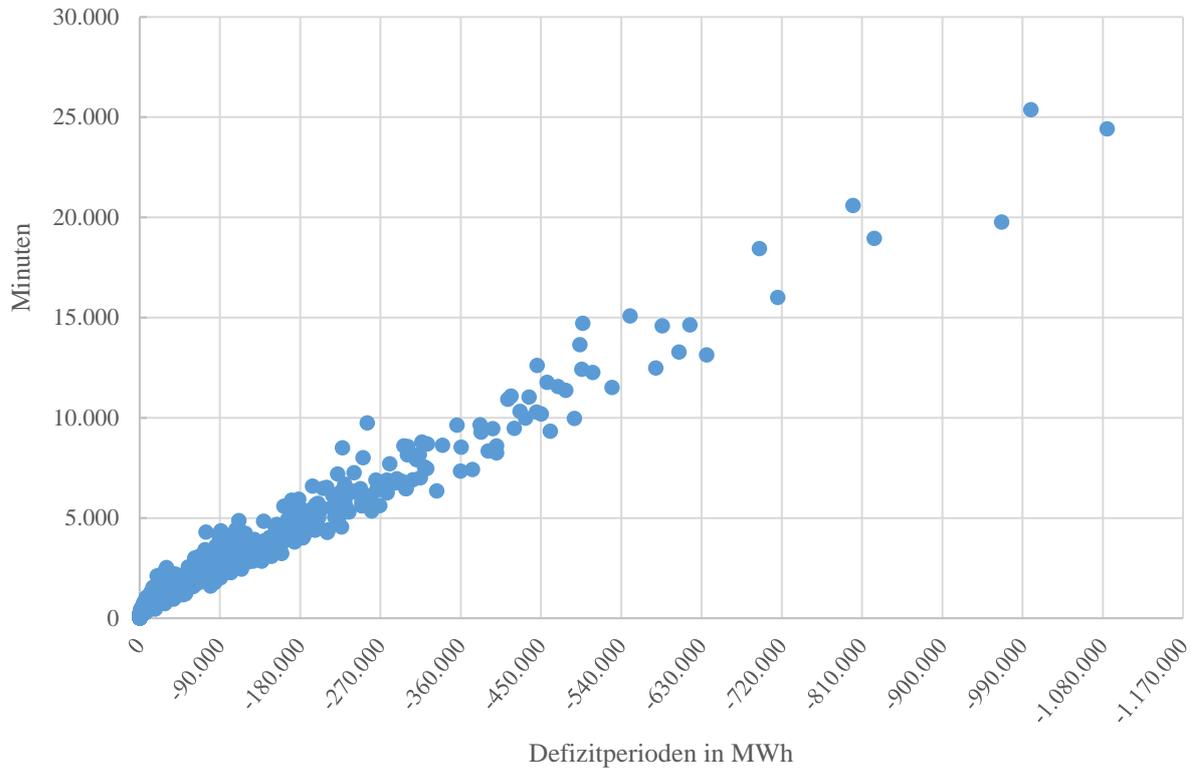
**Tabelle 5.5:** Installierte Leistung (MW) und Realisierte Erzeugung (MWh) in den Jahren 2015 bis 2021 (Bundesnetzagentur, 2022). Berechnung der Volllaststunden und des Nutzungsgrads (nach Bundesnetzagentur, 2022). Modellierung der benötigten installierten Leistung (MW), der Erzeugung (MWh) für das Jahr 2030 basierend auf dem jeweiligen Bezugsjahr mit Differenz (MWh) zur benötigten Energie für die Elektrolyseure und dem Nutzungsgrad der Anlagen.

Datensatz	Gleichung	Energieform	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	Durchschnitt
Installierte Leistung zum 01.01. [MW]		Onshore	55.289	54.499	53.184	52.792	51.633	47.042	41.168	37.701	49.164
		Offshore	7.787	7.774	7.504	6.393	5.051	4.131	3.283	993	5.365
Realisierte Erzeugung [MWh]		Onshore		89.412.264	103.108.325	99.883.328	89.274.961	85.194.406	65.279.156	69.046.437	85.885.554
		Offshore		24.014.602	26.887.437	24.387.353	19.072.795	17.418.477	12.097.494	8.138.732	18.859.556
Volllaststunden (mit installierter Leistung zum 01.01. <sub>-n+1</sub> berechnet)	Gl. 7	Onshore		1.617	1.892	1.878	1.691	1.650	1.388	1.677	1.685
		Offshore		3.084	3.459	3.250	2.983	3.449	2.928	2.479	3.090
Nutzungsgrad	Basierend auf Gl. 6	Onshore		18,5 %	21,5 %	21,4 %	19,3 %	18,8 %	15,8 %	19,1 %	19,2 %
		Offshore		35,2 %	39,4 %	37,1 %	34,1 %	39,4 %	33,3 %	28,3 %	35,2 %
Modellierte installierte Leistung [MW] für das Jahr 2030 nach den Volllaststunden des Bezugsjahres	Gl. 8	Onshore		17.895	15.296	15.409	17.113	17.539	20.855	17.255	17.337
		Offshore		2.448	2.183	2.323	2.530	2.189	2.578	3.045	2.471
Modellierte installierte Leistung [MW] je Viertelstunde für das Jahr 2030 nach den Volllaststunden des Bezugsjahres	Basierend auf Gl. 8	Onshore		4.474	3.824	3.852	4.278	4.385	5.214	4.314	4.334
		Offshore		612	546	581	633	547	644	761	618
Modellierte Erzeugung [MWh] für das Jahr 2030	Basierend auf Gl. 9	Onshore		29.159.252	29.481.361	29.054.959	29.273.079	31.815.434	31.118.302	36.539.490	30.920.268
		Offshore		7.555.812	7.711.603	8.172.164	8.463.982	9.115.294	8.432.623	9.439.657	8.413.019
Modellierte Erzeugung [MWh] für das Jahr 2030 mittels der berechneten Volllaststunden des Bezugsjahres	Gl. 9	Gesamt		36.715.064	37.192.965	37.227.123	37.737.060	40.930.728	39.550.924	45.979.147	39.333.287
Differenz [MW] zur benötigten Energie für die Elektrolyseure	Gl. 10	Gesamt		226.125	604.056	738.184	1.248.121	4.441.789	2.962.016	9.490.208	

**Tabelle 5.6:** Kalkulierte Defizit- und Überschussperioden je Bezugsjahr.

		2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	Durchschnitt
Defizitperioden	Anzahl	145	144	168	161	163	168	171	160
	Dauer in Minuten gesamt	318.255	303.675	306.510	303.795	285.270	297.165	267.930	297.514
	Leistung in TWh gesamt	-11,1	-10,8	-10,0	-10,2	-9,4	-10,2	-9,0	-10,1
	Minimalwert in MWh	-0,28	-2,17	-2,81	-0,76	-0,76	-0,19	-1,52	-1,21
	Dauer der Minimalwertperiode in Minuten	15	15	15	15	30	15	15	17,1
	Maximalwert in MWh	-999.225	-966.490	-715.423	-1.084.803	-585.790	-823.741	-400.033	-796.501
	Dauer der Maximalwertperiode in Minuten	25.380	19.770	16.005	24.420	14.595	18.960	8.250	18.197
	Dauer der Maximalwertperiode in Tagen	18	14	11	17	10	13	6	12,6
Überschussperioden	Anzahl	145	144	168	162	164	169	172	161
	Dauer in Minuten gesamt	207.345	223.365	219.090	221.805	240.330	229.875	257.670	228.497
	Leistung in TWh gesamt	11,3	11,4	10,8	11,5	13,8	13,2	18,5	12,9
	Minimalwert in MWh	0,05	0,02	0,35	0,45	1,13	0,27	0,69	0,42
	Dauer der Minimalwertperiode in Minuten	15	15	15	30	15	15	15	17
	Maximalwert in MWh	1.000.266	1.330.368	2.210.657	935.206	1.026.417	2.181.837	1.936.581	1.517.333
	Dauer der Maximalwertperiode in Minuten	8.850	13.620	23.715	8.850	8.910	19.335	14.280	13.937
	Dauer der Maximalwertperiode in Tagen	6	9	16	6	6	13	10	10

Abbildung 5.5 zeigt die Defizitperioden in MWh gegenüber ihrer Dauer in Minuten für alle sieben modellierten Jahre. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die meisten Defizitperioden eine Dauer von weniger als 10.000 Minuten (166,6 h bzw. 6,94 d) aufweisen. Durch die Berechnung der Quartile zeigt sich, dass 75 % der Defizitperioden kürzer sind als 2.190 Minuten (36,5 h) und bezogen auf die fehlende Erzeugung 75 % ein Defizit von größer als -1.067 MWh aufweisen (Tab. 5.7).



**Abbildung 5.5:** Modellierte Defizitperioden in MWh und Minuten aller sieben Bezugsjahre 2015 bis 2021.

**Tabelle 5.7:** Quartile der Defizit- und Überschussperioden über die modellierten Jahre hinweg.

Quartile	Defizite MWh	Defizite Minuten	Überschüsse MWh	Überschüsse Minuten
Min	-1.084.802,9	15,0	0,0	15,0
0,25 Quartil	-65.936,3	210,0	854,5	210,0
0,5 Quartil	-14.314,1	825,0	9.731,1	622,5
0,75 Quartil	-1.067,6	2.190,0	58.620,7	1.717,5
Max	-0,19	25.380,0	2.210.657,3	23.715,0

Abbildung 5.6 stellt die Überschussperioden in MWh gegenüber ihrer Dauer in Minuten für alle sieben modellierten Jahre dar. Die Abbildung zeigt, dass die meisten Überschussperioden eine Dauer von unterhalb 10.000 Minuten (166,6 h bzw. 6,94 d) aufweisen. Durch die Berechnung der Quartile zeigt sich, dass bezogen auf die Dauer 75 % der Defizitperioden kürzer sind als 1.717 Minuten (28,6 h) und bezogen auf die Erzeugung 75 % einen Überschuss von kleiner als 58.620,7 MWh generieren (Tab. 5.7).

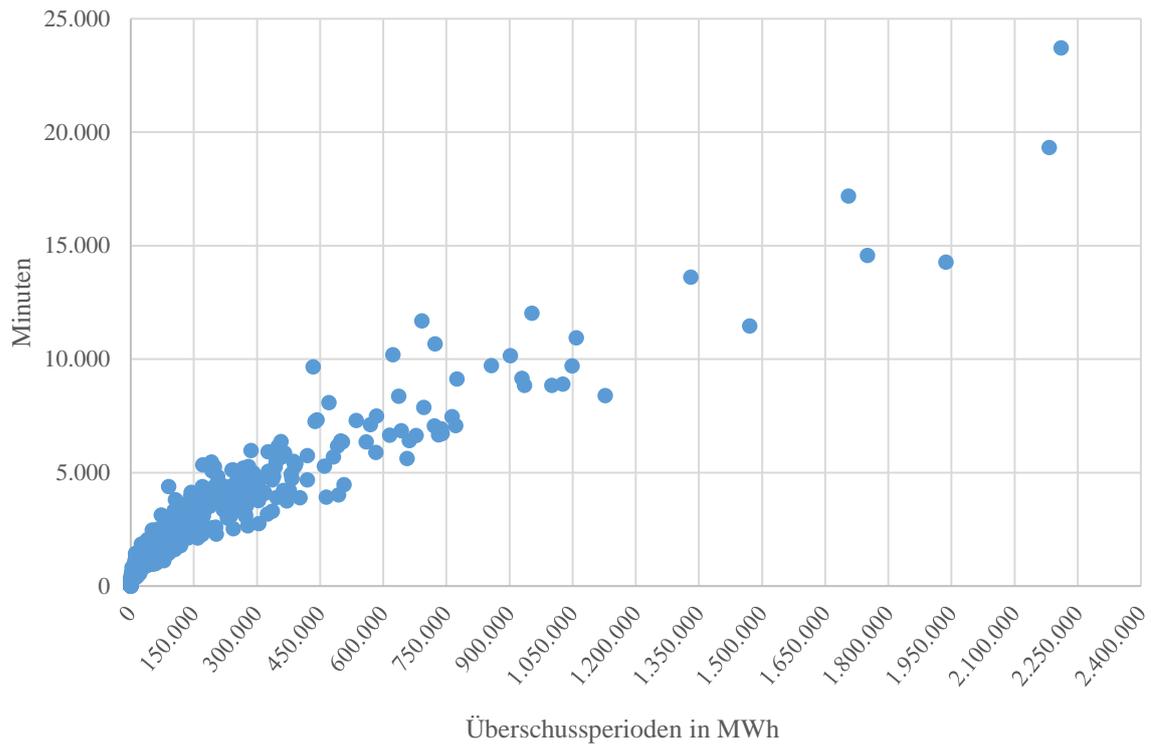


Abbildung 5.6: Modellierte Überschussperioden in MWh und Minuten aller sieben Bezugsjahre 2015 bis 2021.

### 5.5.4 Berechnung des SEE-Bedarfs (Nd, Pr, Dy, Tb) in Windkraftanlagen

Die potenziell kritischen Rohstoffe in Windkraftanlagen sind die Metalle der SEE in den Permanentmagneten der Antriebstechnologien (Tab. 5.8). Von Marscheider-Weidemann et al. (2021) wird angenommen, dass die Materialzusammensetzung von Windkraftanlagen bis 2040 konstant bleibt, auch wenn Verbesserungen z. B. in der Generatorauslegung vorstellbar sind.

**Tabelle 5.8:** Bedarf potenziell kritischer Rohstoffe im Jahr 2030 für Windkraftanlagen in t/GW (nach Marscheider-Weidemann et al., 2021 aus Carrara et al., 2020). Betrachtete Antriebstechnologien: für Onshore: GB-PMSG: Gearbox, permanentmagnetisch erregt, Synchrongenerator; DD-EESG: Direct Drive, elektrisch erregt, Synchrongenerator; für Offshore: DD-PMSG: Direct Drive, permanentmagnetisch erregt, Synchrongenerator; an Land und See einsetzbar: GB-DFIG: Doppelgespeiste Asynchronmaschine, elektrisch erregt (Marscheider-Weidemann et al., 2021).

Verwendung	Onshore [t/GW]		Offshore [t/GW]	On- und Offshore [t/GW]
	GB-PMSG	DD-EESG	DD-PMSG	GB-DFIG
Neodym	51	28	180	12
Praseodym	4	6	35	2
Dysprosium	6	9	17	0
Terbium	1	1	7	0

Mit der Hochrechnung auf ganze WKA (WKA-Typen in Annahme 2, Kap. 5.5.2) ergibt sich für die modellierten Energiebedarfe der Bezugsjahre für das Jahr 2030 ein Bedarf an Neodym zwischen 821,5 t und 1050,2 t (durchschnittlich: 931,2 t), an Praseodym zwischen 168,2 t und 215,8 t (durchschnittlich: 190,7 t), an Dysprosium zwischen 174,8 t und 231,7 t (durchschnittlich: 198,2 t) und an Terbium zwischen 30,6 t und 39,0 t (durchschnittlich: 34,7 t) (Tab. 5.9). Die Minimumwerte sind jeweils auf die Modellierung der benötigten zu installierenden Leistung mit dem Bezugsjahr 2020 zurückzuführen, die Maximalwerte auf die Modellierung mit dem Bezugsjahr 2016 (s. Kap. 5.5.3, Tab. 5.5). Zusammengenommen beträgt der Bedarf dieser SEE min. 0,43 % (Bezugsjahr 2020) und max. 0,55 % (Bezugsjahr 2016) der Jahresproduktion 2018 an Seltenen Erdoxiden.

**Tabelle 5.9:** Bedarf der Seltene Erden Elemente Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium in Windkraftanlagen für die Produktion von Energie für die Elektrolyseure zur Produktion von Wasserstoff zur stofflichen Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland.

Jahr		Durchschnitt	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015
Benötigte installierte Leistung in 2030 rein für die Elektrolyseure nach den Volllaststunden (Jahresendwert) des Bezugsjahrs (MW)	Onshore	17.337	17.895	15.296	15.409	17.113	17.539	20.855	17.255
	Offshore	2.471	2.448	2.183	2.323	2.530	2.189	2.578	3.045
Benötigte installierte Beispielanlagen, aufgerundet	Onshore (E-172 EP5, je 6 MW)	2891	2983	2550	2569	2853	2924	3476	2876
	Offshore (SG 14-222, je 14 MW)	177	175	156	166	181	157	185	218
Gesamte installierte Leistung nach Anlagenbeispiel (GW)	Onshore	18,00	17,90	15,30	15,41	17,12	17,54	20,86	17,26
	Offshore	3,00	2,45	2,18	2,32	2,53	2,20	2,59	3,05
Bedarf kritischer Rohstoffe (t)	Neodym	931,2	942,1	821,5	849,9	935,4	886,9	1050,2	1032,5
	Praseodym	190,7	193,1	168,2	173,8	191,4	182,2	215,8	210,4
	Dysprosium	198,2	202,7	174,8	178,2	197,1	195,3	231,7	207,2
	Terbium	34,7	35,0	30,6	31,7	34,9	32,9	39,0	38,6
	Summe	1354,8	1373,1	1195,2	1233,7	1358,8	1297,3	1536,7	1488,7
Anteilig an der globalen Seltene-Erden-Metall-Produktion 2021	Alle vier Seltenen Erden Elemente	0,49 %	0,50 %	0,43 %	0,45 %	0,49 %	0,47 %	0,55 %	0,54 %

## 5.6 Diskussion

### 5.6.1 Energiebedarf und Modellierung der Energieerzeugung durch Windkraft

Der berechnete Gesamtenergiebedarf der Elektrolyseure (zur Produktion von 0,68 Mio. t Wasserstoff für die stoffliche Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland) von ca. 36,5 TWh/a stellt ungefähr 169 % des Stromverbrauchs der kompletten Stahlindustrie und ca. 7 % des deutschen Stromverbrauchs im Jahr 2020 dar (WV Stahl, 2021; BMWK, 2022). Dies macht ca. 14,1 % der Bruttostromerzeugung aus Erneuerbaren Energien im Jahr 2021 aus (BMWK, 2022). Für das Jahr 2030 prognostiziert die Bundesregierung (2022a) einen Strombedarf von ca. 750 TWh/a (der Stromverbrauch 2022 betrug ca. 500 TWh), davon sollen gemäß § 1 EEG 2023 80 % (600 TWh/a) aus Erneuerbaren Energien stammen. Der berechnete Energiebedarf von 36,5 TWh/a im Jahr 2030 für die Herstellung von Wasserstoff für die deutsche Stahlindustrie hätte in diesem Fall 6 % Anteil am Strombedarf Deutschlands im Jahr 2030. Eine Studie der DVGW (2022) geht für das Jahr 2030 von ca. 450 TWh/a importiertem grünen Wasserstoff aus (Gatzen und Reger, 2022).

Die Wahl der Energieerzeugung für die Elektrolyseure könnte durch Photovoltaik ergänzt werden (Qolipour et al., 2017; Grimm et al., 2020). In Ländern mit einem höheren Aufkommen an Sonneneinstrahlung als Deutschland wird die Produktion von Wasserstoff durch Photovoltaik oder in einer hybriden Konstellation von PV und WKAs bereits geplant und errichtet (IRENA, 2020; IEA, 2022a; Projekt GreenH2Atlantic, 2022). Eine hybride Stromerzeugung für die Elektrolyseure wird das Spektrum an Rohstoffen erhöhen, da bei Photovoltaik (PV) beispielsweise ca. 3 t/MW an Kupfer (für Kabel, Drähte oder Wechselrichter) und ca. 4 t an Silizium (für Dünnschichtzellen) benötigt werden (IEA, 2021a; Bobba et al., 2020).

Eine ausreichende Stromzufuhr aus Windkraft ist nicht zu jeder Viertelstunde gegeben. Die kalkulierten Volllaststunden je Bezugsjahr lagen durchschnittlich bei 1.685 h Onshore und 3.090 h Offshore. Das Fraunhofer Institut ISE (2021) beschreibt, dass die Volllaststunden von Onshore-WKA an ausgewählten küstennahen Standorten in Deutschland bis zu 3.200 h betragen können. Der höchste Wert für Offshore-WKA liegt bei 4.500 h für sehr gute Standorte (ISE, 2021). Die Deutsche Windguard (2020) gibt den höchsten Wert der Mittleren Volllaststunden für Onshore-WKA mit 3.568 h für Schleswig-Holstein und den niedrigsten Wert mit 2.100 h für den Süden von Deutschland für das Jahr 2030 an. Im Ariadne-Report (2021) werden die durchschnittlichen Volllaststunden für das Jahr 2030 mit 2.900 h für Schwachwindanlagen an Land und mit 3.900 h für Windkraftanlagen auf See prognostiziert. Dies wäre eine deutliche Steigerung auf einen Nutzungsgrad von ca. 33 % Onshore und ca. 45 % Offshore im Vergleich zur Modellierung und dem derzeitigen Nutzungsgrad (ausgeschlossen der Ausfallzeit) von durchschnittlich 19,2 % Onshore und 35,2 % Offshore. Auch wenn durch Effizienzsteigerungen in der Windkrafttechnologie die Volllaststunden und damit auch der Nutzungsgrad von Windkraftanlagen erhöht und dadurch mehr Energie erzeugt werden kann, wird eine Auslastung aufgrund der Volatilität des Winds und der Sonne nicht möglich sein.

Die modellierte benötigte installierte Leistung von WKAs von durchschnittlich 17.337 MW Onshore und 2.471 MW Offshore für die Erzeugung von ca. 0,68 t Wasserstoff würde 15,1 % und 8,2 % der geplanten installierten Leistung von WKAs (115 GW und 30 GW gemäß EEG 2023) im Jahr 2030 in Deutschland ausmachen. Mit der steigenden Elektrifizierung in Deutschland werden weitere Abnehmer für Strom im Wärme- und Verkehrssektor auftreten. Der geplante sowie gesetzlich vorgeschriebene Ausbau der Erneuerbaren Energien wird ggf. nicht ausreichend Strom für die wachsende Nachfrage liefern können (vgl. acatech et al., 2017; ewi, 2022a). Dies könnte zu Engpässen in der Lieferkette für die Stahlproduzenten führen, wenn sich nicht ein ausreichend großer Wasserstoffmarkt entwickelt hat.

Die in der vorliegenden Studie kalkulierten möglichen Defizite und Überschüsse der volatilen Energie aus WKAs müssen ausgeglichen werden. Die gegenwärtig möglichen Netzmaßnahmen und verfügbaren Speicherkapazitäten in Deutschland würden dafür nicht ausreichen (vgl. Bundesnetzagentur, 2021). Derzeit müssen Windkraftanlagen, vor allem an Land, aufgrund von fehlenden Netzkapazitäten regelmäßig abgeregelt werden (s. Kap. 5.3.1) (Schwarz und Pfeiffer, 2018). Die derzeitigen verfügbaren Speicherkapazitäten reichen nicht aus, um die thermischen Kraftwerke zu ersetzen (Bundesnetzagentur, 2021). Laut der Bundesnetzagentur (2021) kann die Winderzeugung durch ein Tiefdruckgebiet auch auf über 30 GW über Stunden oder Tage ansteigen – davon könnten lediglich ca. 6 GW mittels der Pumpspeicher (installierte Leistung in Deutschland: 6,7 GW; DENA, 2023) gesichert werden. Die höchste Überschussperiode der modellierten Windkraftanlagen lag bei ca. 2,2 TWh über ca. 16,5 Tage hinweg. Zum flexiblen Ausgleich der Defizitperioden (Dunkelflauten) muss gesicherte Leistung zur Verfügung stehen (vgl. Sinn, 2017; BDEW, 2021). Weder die deutschen Pumpspeicher mit 37,4 GWh Speicherenergieinhalt (Heimerl und Kohler, 2017) und begrenzten Ausbaupkapazitäten noch der Druckluftspeicher Huntorf (Kombination Druckluftspeicher und Gastrubinen-Kraftwerk, 0,3 GWh; Urbansky, 2017) oder Batteriespeicher (ca. 0,75 GWh in Deutschland installiert; Figgener et al., 2023) könnten zur Speicherung aller erzeugter Überschussenergie dienen. Großspeicher Untertage wie der Gasspeicher Rehden (3,9 Mrd.m<sup>3</sup>, 43,68 TWh Speicherkapazität/Arbeitsgasvolumen für Erdgas; astora 2023, 2023a) und Kavernenspeicher (für Erdgas 271 Kavernen mit einem Speichervolumen von ca. 20,5 Mrd. m<sup>3</sup> in Deutschland; Heimerl und Kohler, 2017) sollten als Speicherorte für Wasserstoff, Methanol oder Ammoniak evaluiert werden.

Die notwendige Systemintegration wäre auch im hier diskutierten Fallbeispiel notwendig (vgl. Gils et al., 2021). Ob diese bis zum Jahr 2030 industriekonform vollzogen werden kann, ist fraglich, da beispielsweise die Netzausbaumaßnahmen sich durch komplexe Genehmigungsverfahren über Jahre ziehen können (Schwarz und Pfeiffer, 2018). Für die geplante Elektrifizierung in Deutschland sind Kurzzeit- (beispielsweise Batterien) und Langzeit- (Power2x) Speicheralternativen, Netzausbaumaßnahmen und eine resiliente Energie- und Rohstoffstrategie vonnöten. Der geologische Untergrund Deutschlands erlaubt den Bau unterschiedlichster Speichertechnologien bis zu saisonalen Großspeichern für Wasserstoff.

## 5.6.2 SEE-Bedarf in Windkraftanlagen

Die Summe des SEE-Bedarfs für den Bau zwischen 15,30 GW und 20,86 GW Onshore und 2,18 GW und 3,05 GW Offshore (je nach modelliertem Bezugsjahr) liegt zwischen 1.195,2 t und 1.536,7 t und stellt zwischen 0,43 % und 0,55 % der globalen Produktion aller Seltenen Erdoxide im Jahr 2021 (ca. 277,1 kt, USGS, 2022) dar. Durch ihre diversen Anwendungsgebiete weisen die SEE sowohl in den vergangenen Jahren als auch in der Zukunft global eine wachsende Nachfrage auf. Die hier kalkulierten Mengen erscheinen zwar in globaler Relation gering. Betrachtet man den Bedarf in Europa, wird deutlich, dass in Europa für die Umsetzung der Klima- und Energieziele der Bedarf an kritischen Rohstoffen kontinuierlich wächst. Bezogen auf die von Gregoir und van Acker (2022, S. 69) prognostizierten Bedarfsmengen im Jahr 2030 in Europa<sup>25</sup> stellen die kalkulierten SEE-Mengen für die hier betrachteten WKAs für die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff für die deutsche Stahlindustrie zwischen 33 % und 42 % des europäischen Neodymbedarfs (ca. 2,5 kt), zwischen 24 % und 31 % des europäischen Praseodymbedarfs (ca. 0,7 kt) und zwischen 58 % und 77 % des europäischen Dysprosiumbedarfs (ca. 0,3 kt) dar und sind damit für Europa als hoch zu bewerten. Insgesamt sollen allein in Deutschland bis zum Jahr 2030 115 GW Onshore und 30 GW Offshore zusätzlich installiert werden (Bundesregierung, 2022; § 4 EEG 2023), was bei einem durchschnittlichen SEE-Verbrauch von 68 t/GW gemäß der vorliegenden Studie zu einem Bedarf von 9,9 kt führen wird. Die BGR prognostiziert einen jährlichen globalen Bedarfsanstieg an SEE von ca. 6 % (BGR, 2021a).

Wie auch bei anderen Metallen (z. B. Lithium) dominiert bei den SEE China den Markt entlang der Rohstoffwertschöpfungskette und hat durch seine nahezu Monopolstellung eine gewisse Preis- und Marktkontrolle (Fernandez, 2017; Bobba et al., 2020; Gauß et al., 2021). Die Abhängigkeit von China ist Deutschland und der EU bewusst, SEE werden von der Europäischen Kommission „als die Rohstoffe mit dem höchsten Versorgungsrisiko“ eingestuft und es werden Strategien entwickelt, diese zu verringern (Wissenschaftliche Dienste des Bundestags, 2022). Die OECD (2019, z. B. S. 163) stuft die SEE als die Rohstoffe mit dem höchsten Versorgungsrisiko für ihre Mitgliedsländer ein. Wenn es möglich ist, die Raffination global an Standorten der produzierenden Lagerstätten, darunter Australien, Nordamerika und auch Europa, anzusiedeln und die Bergwerksförderung zu erhöhen, könnte das globale Angebot-Nachfrageverhältnis sich etwas entspannen (OECD, 2019). Explorationserfolge wie die in Schweden in den Vorkommen Norra Karr (ca. 0,55 Mio. t Seltenerdoxid Ressourcen) oder Per Geijer (ca. 1 Mio. t Seltenerdoxid Ressourcen) sind positiv für die Diversifizierung des Angebots zu bewerten, auch wenn ihre Projektentwickler bei langwierigen Erlaubnisprozessen (auch in Schweden) einen möglichen Produktionsbeginn erst in zehn bis 15 Jahren sehen (Lucks und Bowell, 2021; LKAB, 2023). Auch die Vorkommen in Grönland könnten zur Angebotsdeckung beitragen (BGR, 2012), erst im August 2022 gab das kanadische Unternehmen Neo Performance Materials bekannt, Vorkommen explorieren und fördern zu wollen (NPM, 2022).

Auch wenn derzeit das End-of-Life-Recycling zur Rückgewinnung der vier Metalle aus Magneten u. a. aus Elektromotoren, Windturbinen oder elektronischen Geräten entwickelt wird (Sanz et al.,

<sup>25</sup> Der Begriff Europa schließt die 27 Mitgliedstaaten der Europäischen Union, das Vereinigte Königreich und die EFTA-Mitgliedstaaten (Island, Liechtenstein, Norwegen und die Schweiz) mit ein (Gregoir & van Acker, 2022).

2022b, 2022c, 2022d), wird Europa zunächst bis nach 2040 vom Primärangebot an SEE abhängig bleiben, da die Recyclinginfrastruktur ausgebaut werden muss und die Materialien dem Recyclingkreislauf nach ihrem Einsatz zugeführt werden können (Gregoir und van Acker, 2022). Interdisziplinäre Projekte wie das von der EU von 2013 bis 2017 geförderte EREAN (European Rare Earth Magnet Recycling Network, 2017) oder die 2021 ins Leben gerufene ERMA (European Raw Material Alliance) können zur Etablierung einer europäischen autarken Wertschöpfungskette mit inkludierter Recyclingindustrie beitragen.

## 5.7 Schlussfolgerung

Der kalkulierte Energiebedarf von 36,5 TWh, der durch WKA im Jahr 2030 erzeugt und für die Speisung von Elektrolyseuren zur Wasserstofferzeugung zur stofflichen Nutzung in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland vorhanden sein müsste, übersteigt den bisherigen Strombedarf der Stahlindustrie um 69 % (Stand 2020). Mit der für das Jahr 2030 modellierten installierten WKA-Leistung von durchschnittlich 17,3 GW Onshore und 2,5 GW Offshore kann aufsummiert über das Jahr die kalkulierte Energie für die Elektrolyseure erzeugt werden. Allerdings steht der Strom aufgrund der Volatilität nicht kontinuierlich in der Viertelstundenabrechnung zur Verfügung. Im Durchschnitt weisen die Modelljahre (basierend auf den Jahren 2015 bis 2021) 160 Defizit- und 161 Überschussperioden über das jeweilige Jahr hinweg auf, in denen alternativ Strom zur Verfügung gestellt (max. 1,1 TWh in einer Periode) oder gespeichert (max. ca. 2,2 TWh in einer Periode) werden muss. Die deutschen Pump- (0,037 TWh) und Batteriespeicher (0,00075 TWh) (Kurzzeitspeicher) reichen für die kalkulierten benötigten Mengen nicht aus. Der geologische Untergrund Deutschlands bietet allerdings ausreichend Speicherpotenzial für große saisonale P2x-Speicher in Kavernen-, Poren- und Kluftspeichern, und auch für Kurzzeitspeicher in Form von Druckluft oder Wasserkraft.

Der kalkulierte SEE-Bedarf für den Bau der WKAs, zwischen 821,5 t und 1050,2 t an Neodym, zwischen 168,2 t und 215,8 t an Praseodym, zwischen 174,8 t und 231,7 t an Dysprosium und zwischen 30,6 t und 39,0 t an Terbium, stellt einen geringen Anteil (zwischen 0,43 % und 0,55 %) an der globalen Produktion aller Seltenerdoxide im Jahr 2021 dar. Jedoch wird der Bedarf an SEE bis 2030 in Europa für die Umsetzung der EU-Green-Deal-Ziele stark ansteigen und damit die globale Nachfrage erhöhen.

Nutzungsgrade von WKAs können durch neue Technologien weiter erhöht werden, was zu weniger einzelnen Anlagen und damit auch zu einem geringeren Rohstoffverbrauch führen würde. Dennoch bleibt die volatile Energieerzeugung von Wind und Sonne von der meteorologischen Lage und dem Tagesgang abhängig. Ohne neue Ressourcenfunde wird weder der globale Bedarf gedeckt, noch die Importabhängigkeit Europas gelindert werden könnten. Neben Materialeffizienzsteigerungen kann eine Recyclingwertschöpfungskette zum Rohstoffbedarf beitragen, wenn ausreichend Rohstoffe am Ende der Lebensdauer verfügbar sind.

## 6. Schlussfolgerung und Ausblick

### 6.1 Schlussfolgerung

Die inländische Rohstoffförderung, welche zur Bedarfsdeckung bei mineralischen Rohstoffen sowie auch Energierohstoffen beitragen könnte, begegnet nach Meinung der interviewten Experten mehreren Herausforderungen wie beispielsweise einer wachsenden öffentlichen Ablehnung und langwierigen administrativen Prozessen. Auch das Fehlen von Fachkräften und Fachwissen erschwert die Umsetzung von Projekten zur heimischen Rohstoffförderung. Kürzere Prozesslaufzeiten, eine stärkere Einbindung des Themas Rohstoffförderung und -sicherung in die Innenpolitik sowie gute Bedingungen für Fachkräfte sind für die Experten notwendig, damit auch die heimischen Möglichkeiten nachhaltig genutzt werden können. Darüber hinaus ist nach Meinung der Experten für die Rohstoffsicherung über die internationalen Märkte eine erweiterte Einbindung des Themas in die Außenpolitik erforderlich. Diesen erklärten Rahmenbedingungen sind weitere Maßnahmen hinzuzufügen. Das Verarbeitende Gewerbe sollte seinerseits das Thema Rohstoffversorgung konsequenter in seiner Strategie verankern und ggf. die Wertschöpfungsketten tiefer und vertikal durchdringen. Damit die Rohstoffbeschaffung resilient ausgebaut werden kann, ist die Bevölkerung über die ökologischen, ökonomischen und sozialen Konsequenzen des Realisierens oder des Ablehnens einer (heimischen) Rohstoffförderung aufzuklären. Institutionen können zum allgemeinen Verständnis bei allen Akteuren durch Aufklärungsarbeit und das Angebot einer interdisziplinären Ausbildung beitragen.

Die Elektrifizierung des Verkehrs mittels Elektrofahrzeugen mit Batterie (BEVs) erhöht den Bedarf an Lithium für LIBs. Die heimische Aufsuchung von Lithium erfolgt durch Unternehmen in Deutschland und Europa. Ab Mitte der 2020er-Jahre soll das Metall europaweit gefördert werden, sodass ca. 133,6 kt LCE (Lithiumkarbonatäquivalent) jährlich produziert werden können. Für die Batteriezellenproduktion im Jahr 2030 in Deutschland werden je nach berechnetem Szenario zwischen 47,5 kt LCE und 173,2 kt LCE jährlich benötigt. Die höchste heimische Eigenversorgungsquote von 34,5 % (ca. 15 kt LCE) im Jahr 2030 kann durch Reduktion im Lithiumverbrauch und Erhöhung der EOL-RIR (End-of-Life Recycling Input Rate) erreicht werden. Die Studienrechercheergebnisse deuten allerdings darauf hin, dass es aufgrund einer unzureichenden nachgelagerten Wertschöpfungskette unklar ist, ob der Rohstoff innerhalb des Landes oder zumindest innerhalb Europas weiterverarbeitet werden kann. Deutschland wird daher auch in Zukunft auf die VR-China als Hersteller von Zwischenprodukten angewiesen sein. Denn diese hat sich in den vergangenen Jahrzehnten strategisch so ausgerichtet, dass sie für die zukunftsentscheidenden Rohstoffe und Technologien nun entlang der kompletten Wertschöpfungskette global ein unverzichtbarer Akteur und teilweise Monopolist geworden ist. Sollte die heimische Förderung aus Bergbau und Geothermalwasser in Deutschland und Europa nicht realisiert werden können, müssten 100 % des Lithiums in Form von Lithiumchemikalien (Lithiumhydroxid Monohydrat oder Lithiumkarbonat) für die Batteriezellenproduktion in Deutschland und Europa vom außereuropäischen Markt beschafft werden.

Um die THG-Emissionen in der Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland zu reduzieren, müssten nach Rechercheangaben ca. 0,68 Mio. t Wasserstoff pro Jahr eingesetzt werden. Nach der aufgestellten Rechnung im Rahmen dieser Studie wird dies, je nach Volllaststundenannahme, die Errichtung von 4,2 GW bis 5,6 GW Elektrolyseleistung bedingen. Für die Errichtung von zwei der drei der dafür vorgesehenen Elektrolyseurtechnologien ist der Bedarf an Iridium mit 0,2 t bis 0,3 t (für die Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse) und Scandium mit 0,02 t bis 0,05 t (für die Festoxid-Elektrolyse) kalkuliert. Dieser kann nur durch Importe bereitgestellt werden. Bei einem bis 2030 weltweit wachsenden Marktanteil der PEMEL und einer geopolitisch angespannten Beziehung zum Platin- und Palladium-Bergwerksförderland Russland kann die damit einhergehende erhöhte Iridiumnachfrage zu einem Verfügbarkeitsproblem für die heimische Industrie werden. Der Einsatz alternativer Wasserelektrolysetechnologien wie die der Anion-Austausch-Membran-Elektrolyse (AEMEL), die auf potenziell kritische Rohstoffe verzichten kann, könnte einen bevorstehenden Nachfrageüberhang lindern.

Das Betreiben der benötigten Elektrolyseure für die Dekarbonisierung der deutschen Stahlindustrie mit Wasserstoff erfordert ca. 36,5 TWh Energie im Jahr. In der durchgeführten Studie wird die Energie rein aus Windkraft erzeugt, die Berechnung ergibt eine notwendige installierte Leistung von etwa 17,3 GW Onshore und 2,5 GW Offshore im Jahr 2030. Mittels der kalkulierten sieben Modelljahre zur Energieerzeugung im Jahr 2030, welche u. a. auf der tatsächlichen installierten Leistung und der tatsächlichen Erzeugung aus den Jahren 2015 bis 2021 basiert, sind 160 Defizitperioden (max. 1,1 TWh in einer Periode) und 161 Überschussperioden (max. ca. 2,2 TWh in einer Periode) berechnet. Die aktuell verfügbaren deutschen Kurzzeitspeicher Pumpspeicher (ca. 37,4 GWh), Batteriespeicher (ca. 0,195 GWh) und der Druckluftspeicher Huntorf (ca. 0,3 GWh) reichen zum Ausgleich nicht aus. Geologische Kavernen-, Poren- und Kluftspeicher in Deutschland sind als saisonale Speicher zu evaluieren. Für die Errichtung der notwendigen WKAs ist ein Bedarf an den Seltene Erden Elementen (SEE) Neodym zwischen 821,5 t und 1050,2 t, Praseodym zwischen 168,2 t und 215,8 t, Dysprosium zwischen 174,8 t und 231,7 t und Terbium zwischen 30,6 t und 39,0 t kalkuliert. Auch wenn Bergbauprojekte zur Förderung von SEE in Europa angekündigt sind, wird Deutschland im Jahr 2030 vollständig vom Import vom außereuropäischen Markt abhängig sein, da Explorations- und Förderzeiträume 10–15 Jahre betragen können.

Die Abhängigkeit Deutschlands von Importen potenziell kritischer Rohstoffe wird aufgrund unzureichender systemtechnischer sowie infrastruktureller Möglichkeiten und teilweise mangelnder geologischer Verfügbarkeit weiter bestehen bleiben. Als Konsequenz einer global wachsenden Nachfrage wird sie außerdem weiter ansteigen. Neben der Förderung von alternativen Technologien, die auf den Einsatz von potenziell kritischen Rohstoffen verzichten können, werden Effizienzsteigerungen im Materialverbrauch und die Etablierung einer europäischen Recyclingwertschöpfungskette für die Reduzierung des Rohstoffbedarfs unabdingbar sein. Nur mit dem Ausbau des heimischen und europäischen Bergbaus, dem Aufbau von Raffinationsanlagen europaweit sowie einer europäischen Kreislaufwirtschaft, jeweils unter Einbehaltung der notwendigen Umweltschutz- und sozialen Standards, kann die Rohstoffabhängigkeit des derzeitigen rohstoffintensiven Wirtschaftssystems vom außereuropäischen, vor allem chinesischen Markt, verringert und ein Beitrag zur Rohstoffversorgung in Deutschland geleistet werden.

Wenn kein zügiger Aus- und Aufbau erfolgt und global die Nachfrage nach (potenziell kritischen) Rohstoffen nicht abnimmt, wird diese Abhängigkeit in einem hohen Maß über das Jahr 2030 hinaus bestehen bleiben. Auch wenn höhere Rohstoffpreise für heimische Rohstoffförderprojekte die Wirtschaftlichkeit erhöhen, stellen die angestiegenen Energie- und Rohstoffpreise (im Jahr 2022 ausgelöst durch den Krieg Russlands gegen die Ukraine) nicht nur eine Herausforderung für den Geschäftsaufbau oder die Weiterführung von bestehenden Hütten und Raffinationen, sondern auch von nachgelagerten Wirtschaftszweigen in Deutschland dar. Außerdem werden die Verfügbarkeit und Verteilung von Rohstoffen darüber entscheiden, ob Klima-, Energie- und Nachhaltigkeitsziele (u. a. der UN) auf der ganzen Welt erreicht werden können.

## 6.2 Ausblick

Um die in Kapitel 2 erfolgreich ermittelten aktuellen Herausforderungen bei der Rohstoffbeschaffung und -sicherung in Deutschland bestätigen, eingrenzen oder erweitern zu können, wird empfohlen, die Anzahl der befragten Experten in den einzelnen Kategorien entsprechend ihres quantitativen Verhältnisses in der Praxis zu erhöhen. Außerdem sollte der Aufbau zukünftiger Interviews erweitert werden, sodass die bereits erhobenen Herausforderungen integriert und durch alle, auch neu zu befragenden Experten bewertet und damit gewichtet werden können. Dadurch wäre eine statistische Auswertung möglich (vgl. Schuhmacher und Schultmann, 2017). Um eine mögliche Voreingenommenheit des Interviewers zu umgehen, wird außerdem angeraten, für die Kodierung Analyseprogramme wie z. B. MAXQDA heranzuziehen (vgl. Bergmann et al., 2017).

Die Lithiumbedarfsrechnung aus Kapitel 3 könnte in einer Folgestudie weiter konkretisiert werden. Die Szenarioanalyse könnte eine Detailbetrachtung der einzelnen Positionen der Wertschöpfungskette: Exploration und Förderung; Raffination; Elektrodenfertigung; Zellfertigung; Batteriefertigung; Montage im E-Mobil beinhalten. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die betrachteten Märkte von der Rohstoffexploration bis zur Batteriezellenproduktion sehr dynamisch sind und Akteure wie auch deren Zahlen kontinuierlich überprüft und angepasst werden müssen. Es wird empfohlen, die bisher frei zugänglichen Daten durch Unternehmensbefragungen zu verifizieren, wobei zu beachten ist, dass auf kompetitiven Märkten Unternehmen womöglich nicht alle Zahlen, Vereinbarungen und Vorhaben mitteilen. Für eine weitere Studie wird außerdem nahegelegt, auch die weiteren LIB-Metalle wie Nickel und Mangan in eine Rohstoffbedarfskalkulation mit aufzunehmen. Der IEA (2021a) zufolge wird die Herstellung von BEV bis zum Jahr 2040 die Edelstahlproduktion als größten Verbraucher von Nickel ablösen.

Nachdem Kapitel 4 und Kapitel 5 auf dem stofflichen Wasserstoffbedarf für die Stahlproduktion im Jahr 2030 in Deutschland beruhen, wird nahegelegt, für ein umfassendes Ergebnis in einer weiterführenden Studie auch den energetischen Wasserstoffbedarf miteinzubeziehen. Für die Wasserstoffproduktion gilt dabei weiterhin die Marktaufteilung der Elektrolyseurtechnologien im Jahr 2030 zu beobachten. Ob die AEMEL-Technologie, bei der bisher keine potenziell kritischen Rohstoffe verbaut werden müssen, als Alternative zu den drei Marktführern (AEL, PEMEL, SOEL), wirklich im industriellen Maßstab eingesetzt werden kann, ist noch unsicher. Das deutsche Unternehmen Enapter, welches im Jahr 2022 die Serienproduktion sowie diverse Bestellungen aus

der europäischen Industrie bekannt gab, teilte Ende Januar 2023 mit, 10 % seiner Belegschaft aufgrund eines zu geringen Wachstums, Lieferschwierigkeiten und regulatoriver Hürden entlassen zu müssen (Niemeyer, 2023).

Es ist außerdem empfehlenswert, in einer erweiterten Studie den Bedarf aller Rohstoffe für alle involvierten Technologien sowie eine Aufstellung der möglichen schon bestehenden und der neu zu bauenden Infrastruktur, wie beispielsweise Speichertechnologien, zu kalkulieren. Generell ist dabei zu beachten, dass die Angaben zum Rohstoffverbrauch in Technologien unter Umständen nicht exakt dem neusten Stand der Technik entsprechen, da die Bekanntgabe solcher Informationen für Unternehmen wettbewerbsbeeinflussend sein könnte. Neben den potenziell kritischen Rohstoffen könnte folglich auch der Bedarf von Stahl, Aluminium, Nickel oder Kupfer berechnet werden. Grundsätzlich werden in Elektrolyseuren ca. 10.000 kg/MW Stahl, ca. 500 kg/MW Aluminium und ca. 800 kg/MW Nickel verbaut (IEA, 2021). Zusammen mit Kupfer werden diese Rohstoffe global eine steigende Nachfrage auch für den Ausbau von Windkraftanlagen und dem Stromnetz erfahren (Carrara et al., 2020; Hilgers und Becker, 2020; Marscheider-Weidemann et al., 2021) und damit eine konkurrierende Nachfrage herbeiführen. Des Weiteren werden für die Meerwasserentsalzung zur Trinkwassergewinnung einer global wachsenden Weltbevölkerung vermehrt korrosionsfeste Legierungen wie Aluminium-Magnesium (Al-Mg), Chrom-Nickel (Cr-Ni), authentische Stähle und Titan benötigt (z. B. Valdez Salas und Schorr Wiener, 2012). Außerdem ist zu berücksichtigen, dass bei der Erzeugung von Wasserstoff durch die Elektrolyse beispielsweise in einer AEL für 1 kg Wasserstoff 10 l Wasser (high purity) benötigt werden (Siemens, 2021). Bhandari et al. (2014) geben an, dass für den gesamten Lebenszyklus von Wasserstoff, erzeugt durch die Elektrolyse, 26,7 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> Wasser verbraucht werden, eingeschlossen ist hier auch Wasser für die Herstellung von Windturbinen und Speicherbehältern. Wasser, in Trinkwasserqualität, sollte in einer zukünftigen Darstellung des Rohstoffverbrauchs mitaufgenommen und mögliche konkurrierende Funktionen evaluiert werden. Eine aufbauende Studie könnte sich ferner nicht nur auf die Windenergie als Energiequelle für die Elektrolyseure beschränken, sondern in einem weiteren Szenario auch die Kombination mit Photovoltaik kalkulieren. Es gibt verschiedene Photovoltaik-Technologien auf dem Markt, welche sich im Bedarf nach (potenziell kritischen) Rohstoffen unterscheiden. Die c-Si-Technologie (Silizium-Wafer-Technologie; ca. 95 % Marktanteil) und die a-Si-Technologie (Dünnschichtzellen-Technologie) benötigen Silizium (kristallin bzw. amorph) (Aberle, 2006; Marscheider-Weidemann et al., 2021). In der Dünnschichtzellen-Technologie GaAs (Galliumarsenid) wird als Halbleitermaterial Gallium verwendet, in der CI(G)S-Dünnschichtzellen-Technologie (Kupfer-Indium-(Gallium)-Disfluid) werden Indium oder Gallium eingesetzt (Bobba et al., 2020). Laut Carrara et al. (2020) ist es grundsätzlich herausfordernd, die genaue Zusammensetzung von beispielsweise CI(G)S-Solarmodulen zu determinieren, da die Technologie weiterhin als neu und die Produktionsweise als vertraulich einzustufen ist.

Bei allen weiteren Betrachtungen und Bewertungen der Rohstoffversorgung in Deutschland und Europa ist stets parallel die europäische und globale politische Entwicklung zu betrachten. Im Februar 2023 wurde von der EU-Kommission das Vorhaben eines Industrieplans zum Grünen Deal bekanntgegeben, welcher u. a. auch im Bereich der Rohstoffsicherung vorsieht, dass es ein vereinfachtes Regelumfeld geben soll, dass der Zugang zur Finanzierung vereinfacht werden soll und Lieferketten widerstandsfähiger werden sollen (EU-Kommission, 2023).

## 7. Anhang

### 7.1 Allgemeine Struktur der Leitfadeninterviews

Das Intro, den ersten und den dritten Teil des Leitfragebogens erhielt jeder Interviewpartner in gleicher Form. In Teil 2 wurden die Fragen entsprechend der Expertenkatgorie angepasst.

#### Deutsche Version

Interview Nummer	
Datum	
Position in der Rohstoff-Wertschöpfungskette	
Unternehmensstatus (Groß, KMU, Start-up)	
Sitz des Unternehmens und Land des operativen Geschäfts	
Name Institution (Unternehmen, Behörde, Verband, Ministerium)	
Interviewee, Name	
Interviewee, Position	

*(Die grün markierten Zeilen werden bei der Auswertung verwendet, die nicht markierten dienen zur Orientierung der Interviewerin)*

#### Intro

Die Industrie in Europa und insbesondere in Deutschland ist in großem Umfang auf den Import von mineralischen Rohstoffen und Energieressourcen angewiesen. Der Bedarf kann weder durch eine heimische Versorgung noch durch die Kreislaufwirtschaft ausreichend gedeckt werden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob es bei der Rohstoffbeschaffung und -sicherung in Europa und Deutschland Hürden gibt und wenn ja, welche?

Durch Interviews mit Experten entlang der Rohstoffwertschöpfungskette, d. h. von der Exploration über die Verhüttung und Produktion, aber auch mit Behörden und Verbänden, möchte ich herausfinden, ob es auf irgendeiner Ebene Herausforderungen bei der Sicherung der Ressourcenverfügbarkeit in Europa und speziell in Deutschland gibt.

Sollte sich herausstellen, dass es Hürden, Hemmnisse oder Probleme gibt, welche die Rohstoffbeschaffung und -sicherung beeinträchtigen, werden diese im Rahmen meiner Promotion wissenschaftlich aufbereitet und ausgewertet. Die Ergebnisse werden anonymisiert dargestellt. Im nächsten Schritt sollen ggf. Handlungsempfehlungen für die Politik und die Industrie erarbeitet werden.

#### Teil 1 – Freier Einstieg

Leitfrage	Hauptpunkte	Rückfrage

**Teil 2 – Weiterführende Fragen**

Nr.	Leitfrage	Direkte Antwort	Rückfrage	Antwort
n				
...				

**Teil 3 – Freier Abschluss****Englische Version**

Für die nicht deutschsprachigen Interviewpartner wurden die Leitfragebögen auf Englisch übersetzt.

Interview Number	
Date	
Supply Chain Part	
Company Status (Start-up, SME, Large)	
Operating Country	
Institution (company)	
Interviewee, Name	
Interviewee, Position	

**Introduction**

Europe and Germany in particular, are depending on imports of mineral raw materials and energy resources in big scales for the manufacturing industry. Does this mean there are obstacles for the resource security in Europe? We want to find out i.a. through interviews with experts across the supply chain, meaning from exploring over smelting and production to recycling as well as infrastructure actors, if there are challenges on any level of securing resource availability in Europe and especially in Germany. If the result is that there are certain issues, our next research topic is, how we could establish recommendations for actions for politics and the industry.

**Part 1 – Free Narrative**

Key Question	Key Points	Points upon request

**Part 2 – Leading questions**

Nr.	Question	Direct Answer	Further question	Answer
n				
...				

**Part 3 – Free Narrative**

## 7.2 Fragen der Leitfadeninterviews nach Expertenkatgorie

**Tabelle 7.1:** Fragen der einzelnen Themenfelder in Teil 2 der Leitfadeninterviews nach Expertenkatgorie.

Fragen		A1	A2	A3	B	C	D	E	F	G
1.1	Sehen Sie für Ihr Geschäftsmodell eine Zukunft in Deutschland/ Europa?	Sehen Sie für Ihr Geschäftsmodell eine Zukunft in Deutschland/ Europa?	Sehen Sie für Ihr Geschäftsmodell eine Zukunft in Deutschland/ Europa?	Würden Sie Deutschland als Explorations-Standort eine wachsende Bedeutung zuweisen?	-	Würden Sie Deutschland als Explorations-Standort eine wachsende Bedeutung zuweisen?	-	-	Welche Zukunftsrolle würden Sie dem Bergbau in Deutschland zuschreiben?	Sehen Sie für Ihr Geschäftsmodell eine Zukunft in Deutschland/ Europa?
1.2	Wie sehen Sie die Rolle Deutschlands bei der Rohstoffsicherung im internationalen Vergleich?	Wie sehen Sie die Rolle der deutschen Wirtschaft bei der Diversifizierung der Rohstoffquellen im globalen Kontext?	Wie sehen Sie die Rolle der deutschen Wirtschaft bei der Diversifizierung der Rohstoffquellen im globalen Kontext?	Wie sehen Sie die Rolle der deutschen Wirtschaft bei der Verteilung der Rohstoffe im globalen Kontext?	Wie sehen Sie die Rolle der deutschen Wirtschaft bei der Beschaffung der Rohstoffe im globalen Kontext?	Wie schätzen Sie die Bedeutung der Rohstoffverfügbarkeit für die deutsche Industrie ein?	Ist Deutschland/ Europa im Bereich der Rohstoffsicherung konkurrenz- und zukunftsfähig aufgestellt? Wie sehen Sie die Rolle der deutschen Wirtschaft bei der Beschaffung der Rohstoffe im globalen Kontext?	Wie sehen Sie die Rolle der deutschen Wirtschaft bei der Verteilung der Rohstoffe im globalen Kontext?	Erachten Sie die heimische Aufsuchung und Gewinnung von Rohstoffen als essenziell für die deutsche Wirtschaft?	Erachten Sie die heimische Aufsuchung und Gewinnung von Rohstoffen als essenziell für die deutsche Wirtschaft? Um den Status einer Exportnation aufrechtzuerhalten bedarf es Rohstoffimporte. Wie schätzen Sie die Stellung Deutschlands im internationalen Wettbewerb ein?
1.3	Hat die Ausrichtung der Rohstoffsicherung einen Einfluss auf die internationale Konkurrenzfähigkeit Deutschlands?	Hat diese einen Einfluss auf die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Wirtschaft?	Hat diese einen Einfluss auf die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Wirtschaft?	Hat die globale Verteilung der Rohstoffe einen Einfluss auf die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Wirtschaft?	Hat diese einen Einfluss auf die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Wirtschaft?	Hat diese einen Einfluss auf die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Wirtschaft?	Hat diese einen Einfluss auf die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Wirtschaft?	Hat diese einen Einfluss auf die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Wirtschaft?	-	-
2.1.1	Sollte der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage eine Rolle haben?	Sollte der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage eine Rolle haben?	Sollte der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage eine Rolle haben?	Sollte der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage eine Rolle haben?	Sollte der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage eine Rolle haben?	Sollte der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage eine Rolle haben?	Sollte der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage eine Rolle haben?	Sollte der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage eine Rolle haben?	Sollte der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage eine Rolle haben?	-
2.1.2	Welche Rolle sollte der Staat übernehmen?	Welche Rolle hat für Sie der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage?	Welche Rolle hat für Sie der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage?	Welche Rolle hat für Sie der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage?	-	-	Welche Rolle hat für Sie der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage?	Welche Rolle hat für Sie der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage?	Welche Rolle hat für Sie der Staat bei der Rohstoffverfügbarkeitsfrage?	-

Fragen		A1	A2	A3	B	C	D	E	F	G
2.2	Gibt es ausreichende staatliche Regularien im Bereich der Rohstoffbeschaffung?	Gibt es ausreichende staatliche Regularien im Bereich der Rohstoffbeschaffung?	Gibt es ausreichende staatliche Regularien im Bereich der Rohstoffbeschaffung?	Gibt es ausreichende staatliche Regularien im Bereich der Rohstoffbeschaffung?	Gibt es ausreichende staatliche Regularien im Bereich der Rohstoffbeschaffung?	Gibt es ausreichende staatliche Regularien im Bereich der Rohstoffbeschaffung?	Gibt es ausreichende staatliche Regularien im Bereich der Rohstoffbeschaffung?	Gibt es ausreichende staatliche Regularien im Bereich der Rohstoffbeschaffung?	Gibt es ausreichende staatliche Regularien im Bereich der Rohstoffbeschaffung?	Ist die gesetzliche Lage für die Rohstoffaufsuchung, -gewinnung und -nutzung ausreichend? Bedarf es Erneuerungen in einem Bereich? Sehen Sie Erneuerungsbedarf in Strukturen und Verfahren den Bergbau und die entsprechenden Behörden betreffend?
2.3	Was ist Ihre Meinung zu Veröffentlichungen der Regierung wie beispielsweise der Rohstoffstrategie? Werden dort die Verantwortlichkeiten klar geregelt?	Ist die Deutsche Rohstoffstrategie für die Wirtschaft / für rohstofffördernde Unternehmen ein unterstützendes Instrument? Werden dort die Verantwortlichkeiten klar geregelt?	Ist die Deutsche Rohstoffstrategie für die Wirtschaft / für rohstofffördernde Unternehmen ein unterstützendes Instrument? Werden dort die Verantwortlichkeiten klar geregelt?	Was ist Ihre Meinung zu Veröffentlichungen der Regierung wie beispielsweise der Rohstoffstrategie? Werden in solchen Publikationen die Verantwortlichkeiten klar ausgedrückt? Fühlt sich die Industrie dadurch angesprochen?	Was ist Ihre Meinung zu Veröffentlichungen der Regierung wie beispielsweise der Rohstoffstrategie? Werden in solchen Publikationen die Verantwortlichkeiten klar ausgedrückt?	Was ist Ihre Meinung zu Veröffentlichungen der Regierung wie beispielsweise der Rohstoffstrategie? Werden in solchen Publikationen die Verantwortlichkeiten klar ausgedrückt?	Was ist Ihre Meinung zu Veröffentlichungen der Regierung wie beispielsweise der Rohstoffstrategie? Werden in solchen Publikationen die Verantwortlichkeiten klar ausgedrückt? Fühlt sich die Industrie dadurch angesprochen?	Was ist Ihre Meinung zu Veröffentlichungen der Regierung wie beispielsweise der Rohstoffstrategie? Werden in solchen Publikationen die Verantwortlichkeiten klar ausgedrückt? Fühlt sich die Industrie dadurch angesprochen?	Was ist Ihre Meinung zu Veröffentlichungen der Regierung wie beispielsweise der Rohstoffstrategie? Werden in solchen Publikationen die Verantwortlichkeiten klar ausgedrückt? Fühlt sich die Industrie dadurch angesprochen?	Wie erachten Sie die Neuauflage der Rohstoffstrategie der Bundesregierung? Waren Sie an der Ausarbeitung beteiligt? Wird eine regelmäßige Überarbeitung der Rohstoffstrategie notwendig sein?
2.4	Wird Ihr Unternehmen/ Tätigkeitsbereich/ die deutsche Wirtschaft von den Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität betroffen sein?	Ist Ihr Unternehmen von deutschen und europäischen Regularien außerhalb des Bergrechts im Bereich des Klimaschutzes betroffen?	Ist Ihr Unternehmen von deutschen und europäischen Regularien außerhalb des Bergrechts im Bereich des Klimaschutzes betroffen?	Wird Ihr Unternehmen von den anstehenden Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität (EU Green Deal etc.) betroffen sein? Wenn ja, wie und wie stark? Haben Sie bereits Maßnahmen dafür eingeleitet?	Wie nimmt das Vorhaben der Klimaneutralität in Europa Einfluss auf die Geschäfte Ihrer Mitglieder?	Wie wird sich das Ziel Klimaneutralität auf die Mitglieder Ihres Verbandes / auf die deutsche Wirtschaft auswirken? Im Speziellen, welchen Einfluss nehmen die Energie- und Mobilitätswende?	Inwieweit ist Ihre Arbeit vom EU oder deutschen Recht betroffen? Müssen Sie auf Vorhaben, wie sie beispielsweise im EU Green Deal festgelegt sind, reagieren? Hat das Vorhaben der Klimaneutralität in Europa Einfluss auf Ihr Geschäftsfeld?	Müssen Sie auf Vorhaben, wie sie beispielsweise im EU Green Deal festgelegt sind, reagieren? (Tätigkeitsbereich)	-	Wie denken Sie, wird sich das Vorhaben der Klimaneutralität in Europa auf die deutsche Industrie und den Rohstoffbedarf auswirken?
3	Wie würden Sie die Zusammenarbeit mit den Landesbergbehörden / mit den Unternehmen beschreiben?	Wie würden Sie die Zusammenarbeit mit der Landesbergbehörde beschreiben?	Wie würden Sie die Zusammenarbeit mit der Landesbergbehörde beschreiben?	-	Wie würden Sie die Zusammenarbeit von Bergbauunternehmen und Behörden in Deutschland bewerten?	Arbeiten Sie mit Behörden und Rohstoffunternehmen proaktiv zusammen?	-	-	Wie würden Sie die Zusammenarbeit mit den Unternehmen beschreiben?	Wie stellt sich die Zusammenarbeit mit Unternehmen / anderen Behörden dar?

Fragen		A1	A2	A3	B	C	D	E	F	G
4.1	Gab es in Ihrer Zeit Veränderungen in der Verfügbarkeit von Rohstoffen für Ihr Unternehmen / die Mitglieder Ihres Verbands?	-	-	Gab es in Ihrer Zeit Veränderungen in der Verfügbarkeit von Rohstoffen für Ihr Unternehmen?	Gab es in Ihrer Zeit Veränderungen in der Verfügbarkeit von Rohstoffen für die Mitglieder Ihres Verbands?	-	-	-	-	-
4.2	Hat Ihr Unternehmen / haben Ihre Mitglieder eine spezifische Strategie zur Sicherung der benötigten Rohstoffe?	-	-	Hat Ihr Unternehmen eine spezifische Strategie zur Sicherung der benötigten Rohstoffe?	Sind die benötigten Rohstoffe für die Unternehmen in Ihrem Verband langfristig gesichert?	-	-	-	-	-
4.3	Denken Sie, in Deutschland sollte die Lagerung/ Vorhaltung von bestimmten Rohstoffen als Möglichkeit in Betracht gezogen werden?	-	-	-	Denken Sie, in Deutschland sollte die Lagerung/ Vorhaltung von bestimmten Rohstoffen als Möglichkeit in Betracht gezogen werden?	Denken Sie, in Deutschland sollte die Lagerung/ Vorhaltung von bestimmten Rohstoffen als Möglichkeit in Betracht gezogen werden?	-	-	-	-
4.3 Zusatz	Wer sollte sich darum kümmern? Die Industrie oder der Staat?	-	-	-	Wer sollte sich darum kümmern? Die Industrie oder der Staat?	Wer sollte sich darum kümmern? Die Industrie oder der Staat?	-	-	-	-
5	Herausforderungen	Was sind die Hürden in Europa und Deutschland für Explorationsunternehmen?	Müssen Sie (formellen) Hürden entgegnetreten?	Müssen Sie formellen Hürden entgegnetreten?	Müssen Ihre Mitglieder formellen Hürden bei der Ausführung Ihrer Tätigkeit entgegnetreten? Wenn ja, welchen?	Erfahren Sie Hürden bei der Ausübung Ihrer Tätigkeit (im Kontext Rohstoffe) ?	Müssen Sie formellen Hürden entgegnetreten? Wenn ja, welchen?	Müssen Sie formellen Hürden entgegnetreten?	Auf welche Hürden stoßen Sie bei der Ausführung Ihrer Tätigkeit?	Welchen Hürden begegnet Ihre Abteilung bzgl. der Rohstoffsicherung?
5.1 Zusatz	Fachkräftemangel	-	Erfahren Sie Fachkräftemangel bei der Suche nach neuem Personal? Erfahren Sie auch fehlendes Fachwissen im Umgang mit anderen Unternehmen oder Behörden?	-	Erfahren Sie und/oder die Mitglieder Ihres Verbands einen Fachkräftemangel bei Ihrer Tätigkeit?	Erfahren Sie einen Fachkräftemangel bei Ihrer Tätigkeit?	Gehören dazu auch die Beschaffung von Kapital, die Einstellung von Fachkräften, rechtliche Aspekte, öffentliche Akzeptanz usw.?	Gehören dazu auch die Beschaffung von Kapital, die Einstellung von Fachkräften, rechtliche Aspekte, öffentliche Akzeptanz usw.?	-	Gibt es Bereiche, in denen Fachkräftemangel herrscht? Gibt es Disziplinen, die an den Universitäten ausgebaut oder erneuert werden könnten? Erfahren Sie einen Fachkräftemangel bei Ihrer Tätigkeit? Bezieht sich dieser auf rohstoffnahe Disziplinen?

Fragen		A1	A2	A3	B	C	D	E	F	G
5.2 Zusatz	Verfahrensbezogen	-	-	-	Wie gestalten sich die notwendigen rechtlichen Verfahren zum Rohstoffabbau für Ihre Mitglieder? Haben diese sich in den vergangenen Jahren gewandelt? Wenn ja, wie ist dieser Wandel zu bewerten?	-	-	-	Stehen diese in Zusammenhang mit dem Fortschreiten von bergbaulichen Projekten?	-
6	Geschäftsspezifisch	Wieso haben Sie sich für ein Explorations- und Förderprojekt in/ außerhalb Europas entschieden?	Gibt es Unterschiede in der Vorbereitung und Ausführung von innerdeutschen, innereuropäischen und internationalen Explorationsprojekten?	Spielen geopolitische Umstände eine Rolle in der Sicherstellung der Verfügbarkeit der Rohstoffe, die Ihr Unternehmen benötigt?	Welchen Einfluss nehmen die Energie- und Mobilitätswende?	Wie stark (Arbeitsaufwand) und wie (Art der Arbeit) beschäftigt sich Ihr Verband mit heimischen Rohstoffförderprojekten?	Wer sind Ihre Kunden? Internationale Unternehmen oder auch deutsche/ europäische?	Bemerken Sie Veränderungen in Forschungsaufträgen aus der Industrie bzgl. Rohstoffverwendung?	Welche Größe haben die Unternehmen, die bei Ihnen Anträge stellen, Genehmigungen einholen / grds. unter Bergrecht fallen?	In der Rohstoffstrategie heißt es, „dass in erster Linie die Unternehmen verantwortlich sind, ihre Rohstoffversorgung sicherzustellen“. Denken Sie, dies wird ausreichend und auf Weitsicht von den Unternehmen betrieben?
		Gibt es Unterschiede in der Vorbereitung und Ausführung von innerdeutschen, innereuropäischen und internationalen Explorationsprojekten?	Hat sich die Aufsuchung nach Rohstoffen für Ihr Unternehmen in den vergangenen Jahren verändert? Wenn ja, bitte näher erläutern.	Wenn Sie mit internationalen Unternehmen zusammenarbeiten, wie würden Sie das Verhältnis zu diesen beschreiben?	Wird das neue Lieferkettengesetz Auswirkungen auf die Tätigkeiten Ihrer Mitglieder haben? Wenn ja, welche?		Gibt es formelle Unterschiede in der Zusammenarbeit?	Haben sich die Bedingungen von Forschungsprojekten bei Anträgen bei öffentlichen Trägern hinsichtlich des Einsatzes von Rohstoffen verändert?	Gegenüber wie vielen weiteren Behörden müssen Sie die Interessen der in Ihrem Bereich unter Bergrecht fallenden Unternehmen vertreten?	
		Wo beschaffen Sie das Kapital?		Wer sind Ihre Geschäftspartner? Im Einkauf wie im Verkauf.				Wie weit sind Sie vom globalen Markt in Ihrer Forschung beeinflusst?	Wie viele Behörden sind grds. bei einem Genehmigungsprozess für eine Aufsuchung/ Gewinnung involviert?	Im Speziellen, welchen Einfluss nehmen die Energie- und Mobilitätswende?
		Haben europäische/ deutsche Investoren eine andere Portfoliopräferenz?		Was ist die Rolle des globalen Marktes?					Ist die Aufsuchung, Gewinnung und Nutzung von Georessourcen heute schwieriger als in der Vergangenheit?	
									Gab es Veränderungen in den Prozessen, welche die Arbeit für Unternehmen erschwerte?	

## 7.3 Batteriezellenproduktionsstandorte in Europa

**Tabelle 7.2:** Liste der potenziellen Batteriezellenproduktionsstandorte in Europa

Unternehmen	Haupt-sitz	Produktions-land	Produktionsstandort	Status	Beginn Produktion	Technologie	Kapazität zu Beginn [GWh]	Max. Kapazität [GWh]	Max. Kapazität [GWh]2	Quelle (21.07.2022)
ACC (Stellantis, SAFT, Mercedes, Total)	FRA	Deutschland	Kaiserslautern	Angekündigt	2025	Batteriezellen	13,4	40	40	<a href="https://www.acc-emotion.com/">https://www.acc-emotion.com/</a> <a href="https://www.acc-emotion.com/stories/kaiserslautern-acc-actively-preparing-its-deployment-germany">https://www.acc-emotion.com/stories/kaiserslautern-acc-actively-preparing-its-deployment-germany</a>
ACC (Stellantis, SAFT, Mercedes, Total)	FRA	Frankreich	Billy-Berclau Douvrin	Angekündigt	2023 - 2029	Batteriezellen und Module	8	40	40	<a href="https://www.acc-emotion.com/facilities/billy-berclau">https://www.acc-emotion.com/facilities/billy-berclau</a>
ACC (Stellantis, SAFT, Mercedes, Total)	FRA	Italien	Termoli	Angekündigt	2030	Batteriezellen	40	40	40	<a href="https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2022/march/stellantis-affirms-commitment-to-italy-with-automotive-cells-company-s-acc-planned-battery-plant-investment">https://www.stellantis.com/en/news/press-releases/2022/march/stellantis-affirms-commitment-to-italy-with-automotive-cells-company-s-acc-planned-battery-plant-investment</a>
Akasol	DEU	Deutschland	Darmstadt	Angekündigt	2021	Li-Ionen-NMC	1	5	5	<a href="https://www.akasol.com/de/news-akasol-eroeffnung-gigafactory1">https://www.akasol.com/de/news-akasol-eroeffnung-gigafactory1</a>
AMTE	UK	UK	Thurso	Angekündigt	2023	Batteriezellen (Natrium-Ionen)	0,1	10	10	<a href="https://amtepower.com/investors/about-amte-power/">https://amtepower.com/investors/about-amte-power/</a>
Beyonder	NOR	Norwegen	Rogaland	Angekündigt	2025	Li-Ionen-Zellen	k. A.	k. A.	k. A.	<a href="https://www.beyonder.no/technology">https://www.beyonder.no/technology</a> <a href="https://www.equinor.com/news/ev/invests-beyonder">https://www.equinor.com/news/ev/invests-beyonder</a>
Blackstone Resources	CH	Deutschland	Döbeln	Angekündigt	2023	Batteriezellen und Feststoffbatterien	0,5	5	5	<a href="https://www.blackstoneresources.ch/presse/2022/01/19/blackstone-resources-erwirbt-grundstueck-fuer-5-gwh-produktion/#:~:text=%E2%80%9CIn%20the%20first%20intermediate%20step,annual%20capacity%20in%202023%2D24.">https://www.blackstoneresources.ch/presse/2022/01/19/blackstone-resources-erwirbt-grundstueck-fuer-5-gwh-produktion/#:~:text=%E2%80%9CIn%20the%20first%20intermediate%20step,annual%20capacity%20in%202023%2D24.</a>
Britishvolt	UK	UK	Northumberland	Angekündigt	2023	Batterietyp 4690	10	38	38	<a href="https://www.britishvolt.com/news/britishvolt-announces-roadmap-for-development-of-46900-tailored-battery-cell-technology-for-high-performance-evs-and-beyond/">https://www.britishvolt.com/news/britishvolt-announces-roadmap-for-development-of-46900-tailored-battery-cell-technology-for-high-performance-evs-and-beyond/</a>
CATL	VRC	Deutschland	Erfurt, Arnstadt	Angekündigt	2022	Batteriezellen	8	14	14	<a href="https://www.catl.com/en/news/921.html">https://www.catl.com/en/news/921.html</a>
Cellforce (Porsche)	DEU	Deutschland	Tübingen	Angekündigt	2024	NMC	0,1	0,1	0,1	<a href="https://newsroom.porsche.com/de/2021/unternehmen/porsche-investition-fabrik-hochleistungs-batteriezellen-cellforce-group-gmbh-joint-venture-partner-customcells-24852.html">https://newsroom.porsche.com/de/2021/unternehmen/porsche-investition-fabrik-hochleistungs-batteriezellen-cellforce-group-gmbh-joint-venture-partner-customcells-24852.html</a> <a href="https://www.customcells.de/news/customcells-aktuell/detail/cellforce-group-gibt-produktionsstaette-bekannt/">https://www.customcells.de/news/customcells-aktuell/detail/cellforce-group-gibt-produktionsstaette-bekannt/</a>
CEZ Group	CZE	Tschechische Republik		Angekündigt	2028	Batteriezellen	40	40	40	<a href="https://www.cez.cz/en/media/press-releases/the-first-step-to-towards-the-construction-of-the-gigafactory.-the-mit-and-cez-sign-a-memorandum-147566">https://www.cez.cz/en/media/press-releases/the-first-step-to-towards-the-construction-of-the-gigafactory.-the-mit-and-cez-sign-a-memorandum-147566</a>
Eleven Es	SER	Serbien	Subotica	Angekündigt	2023	LFP-Batteriezellen, Batterien	0,3	16	16	<a href="https://www.innoenergy.com/news-events/elevenes-receives-investment-and-support-from-eit-innoenergy-to-build-a-battery-gigafactory-near-serbias-lithium-deposit/">https://www.innoenergy.com/news-events/elevenes-receives-investment-and-support-from-eit-innoenergy-to-build-a-battery-gigafactory-near-serbias-lithium-deposit/</a>
Envision AESC	JAP	Frankreich	Douai	Angekündigt	2024 - 2030	Batteriezellen	9	24	24	<a href="https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/the-douai-factory-is-now-at-the-heart-of-the-groups-industrial-strategy-for-batteries/">https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/the-douai-factory-is-now-at-the-heart-of-the-groups-industrial-strategy-for-batteries/</a>
Envision AESC	JAP	UK	Sunderland	Existierend, Ausweitung angekündigt	2024 - 2030	Batteriezellen	9	35	35	<a href="https://www.envision-aesc.com/en/news.html">https://www.envision-aesc.com/en/news.html</a>

Unternehmen	Hauptsitz	Produktionsland	Produktionsstandort	Status	Beginn Produktion	Technologie	Kapazität zu Beginn [GWh]	Max. Kapazität [GWh]	Max. Kapazität [GWh]2	Quelle (21.07.2022)
Envision AESC + VENERGY+	JAP	Spanien	Navalmoral de la Mata	Angekündigt	2025 - 2030	Batteriezellen, Module, packs	10	30	30	<a href="https://www.envision-aesc.com/en/news.html">https://www.envision-aesc.com/en/news.html</a>
FAAM (Seri Industrial)	ITA	Italien	Teverola	Angekündigt	2021	Batteriezellen, Module, Li-Batterien	0,35	8	8	<a href="https://seri-industrial.it/eng/index.php/p-lithium">https://seri-industrial.it/eng/index.php/p-lithium</a>
Freyr	NOR	Finland	Vaasa	Angekündigt	2025 - 2028	Batteriezellen	k. A.	k. A.	k. A.	<a href="https://www.freyrbattery.com/news/freyr-battery-concludes-raw-materials-agreement">https://www.freyrbattery.com/news/freyr-battery-concludes-raw-materials-agreement</a>
Freyr	NOR	Norwegen	Mo i Rana	Angekündigt	2023 - 2030	NMC battery cells	29	200	200	<a href="https://www.freyrbattery.com/news/freyr-battery-sanctions-construction-of-its-inaugural-gigafactory">https://www.freyrbattery.com/news/freyr-battery-sanctions-construction-of-its-inaugural-gigafactory</a>
Gotion	VRC	Deutschland	Göttingen	Angekündigt	2023	Batteriezellen	3,5	18	18	<a href="https://gdcv.de/gigafactory-von-gotion-high-tech-in-goettingen-eroeffnet-werkstattgesprach-mit-dr-ahmet-toptas-leiter-des-goettinger-werks-von-gotion-deutschland/">https://gdcv.de/gigafactory-von-gotion-high-tech-in-goettingen-eroeffnet-werkstattgesprach-mit-dr-ahmet-toptas-leiter-des-goettinger-werks-von-gotion-deutschland/</a> <a href="https://www.goettinger-tageblatt.de/wirtschaft/regional/chinesischer-akku-hersteller-gotion-ubernimmt-gottinger-bosch-werk-JEXUPYEH3FAKZEV4DQBWZDLMPU.html">https://www.goettinger-tageblatt.de/wirtschaft/regional/chinesischer-akku-hersteller-gotion-ubernimmt-gottinger-bosch-werk-JEXUPYEH3FAKZEV4DQBWZDLMPU.html</a> <a href="https://www.dgap.de/dgap/News/corporate/gotion-hightech-intends-invest-production-base-europe-with-annual-production-capacity-gwh/?newsID=1602925">https://www.dgap.de/dgap/News/corporate/gotion-hightech-intends-invest-production-base-europe-with-annual-production-capacity-gwh/?newsID=1602925</a> <a href="https://eqs-cockpit.com/cgi-bin/fncs.ssp?fn=download2_file&amp;code_str=ASQJNVBRSD">https://eqs-cockpit.com/cgi-bin/fncs.ssp?fn=download2_file&amp;code_str=ASQJNVBRSD</a>
inoBat	SVK	Slowakei		Angekündigt	2024		1	31	31	<a href="https://inobatauto.eu/newsroom/inobat-auto-announces-intention-to-build-its-third-gigafactory-in-western-europe/">https://inobatauto.eu/newsroom/inobat-auto-announces-intention-to-build-its-third-gigafactory-in-western-europe/</a>
Italtvolt	ITA	Italien	Scarmagno, Romano Canvese	Angekündigt	2024	Batteriezellen	45	45	45	<a href="https://www.italvolt.com/italvolt-signs-memorandum-of-understanding-for-the-gigafactory-of-scarmagno-and-romano-canavese-2/">https://www.italvolt.com/italvolt-signs-memorandum-of-understanding-for-the-gigafactory-of-scarmagno-and-romano-canavese-2/</a>
Leclanché + Eneris Group	FRA	Deutschland	Willstätt	Angekündigt	2025	NMC	0,12	1	1	<a href="https://www.leclanche.com/wp-content/uploads/2020/10/Leclanche-Corporate-Presentation-February-2022-.pdf">https://www.leclanche.com/wp-content/uploads/2020/10/Leclanche-Corporate-Presentation-February-2022-.pdf</a>
LG Chem	KOR	Polen	Biskupice Podgórze	Existierend, zur Ausweitung angekündigt	2016 - 2025	Batteriezellen, Module, packs	70	115	115	<a href="https://lgensol.pl/en/about-us/">https://lgensol.pl/en/about-us/</a>
Microvast	US	Deutschland	Ludwigsfelde	Produktion	2021	Batteriemodule			6	<a href="https://cicenergigune.com/en/blog/gigafactories-europe-commitment-economic-recovery-battery-factories">https://cicenergigune.com/en/blog/gigafactories-europe-commitment-economic-recovery-battery-factories</a>
Morrow/Haldor Topsoe	NOR	Norwegen	Eyede Energiepark	Angekündigt	2024	Batteriezellen	43	43	43	<a href="https://www.morrowbatteries.com/about-us">https://www.morrowbatteries.com/about-us</a>
Northvolt	SWE	Deutschland	Heide	Angekündigt	2025	Batteriezellen	60	60	60	<a href="https://northvolt.com/articles/northvolt-2022-where-we-stand/">https://northvolt.com/articles/northvolt-2022-where-we-stand/</a> <a href="https://northvolt.com/articles/northvolt-drei/">https://northvolt.com/articles/northvolt-drei/</a> <a href="https://www.heide.de/artikelansicht/buergermeister-zur-geplanten-northvolt-gigafactory-unsere-vision-wird-wirklichkeit.html">https://www.heide.de/artikelansicht/buergermeister-zur-geplanten-northvolt-gigafactory-unsere-vision-wird-wirklichkeit.html</a> <a href="https://www.landtag.ltsh.de/infothek/wahl19/drucks/03700/drucksache-19-03755.pdf">https://www.landtag.ltsh.de/infothek/wahl19/drucks/03700/drucksache-19-03755.pdf</a>
Northvolt	SWE	Schweden	Borlänge	Angekündigt	2026	Batteriezellen	100	100	100	<a href="https://northvolt.com/articles/northvolt-2022-where-we-stand/">https://northvolt.com/articles/northvolt-2022-where-we-stand/</a> <a href="https://northvolt.com/articles/northvolt-to-transform-closed-paper-mill-in-sweden-into-new-gigafactory/">https://northvolt.com/articles/northvolt-to-transform-closed-paper-mill-in-sweden-into-new-gigafactory/</a>
Northvolt + Volvo Cars JV	SWE	Schweden	Göteborg	Angekündigt	2023 - 2026	Batteriezellen	50	50	50	<a href="https://northvolt.com/articles/volvo-car-group-and-northvolt-to-join-forces-in-battery-development-and-production/">https://northvolt.com/articles/volvo-car-group-and-northvolt-to-join-forces-in-battery-development-and-production/</a> <a href="https://northvolt.com/articles/northvolt-2022-where-we-stand/">https://northvolt.com/articles/northvolt-2022-where-we-stand/</a>
Northvolt, Volkswagen	SWE	Schweden	Skellefteå	Angekündigt	2023	NMC chemistry cells	16	60	60	<a href="https://northvolt.com/articles/northvolt-2022-where-we-stand/">https://northvolt.com/articles/northvolt-2022-where-we-stand/</a> <a href="https://www.volkswagen.de/de/elektrofahrzeuge/elektromobilitaet-erleben/elektroauto-technologie/batteriezellenfabriken-neue-kapazitaeten-in-europa.html">https://www.volkswagen.de/de/elektrofahrzeuge/elektromobilitaet-erleben/elektroauto-technologie/batteriezellenfabriken-neue-kapazitaeten-in-europa.html</a>
Phi4tech	ESP	Spanien	Badajoz	Angekündigt	2022	Batteriezellen	2	10	10	<a href="https://www.phi4tech.com/energy-storage/">https://www.phi4tech.com/energy-storage/</a>

Unternehmen	Haupt-sitz	Produktions-land	Produktionsstandort	Status	Beginn Produktion	Technologie	Kapazität zu Beginn [GWh]	Max. Kapazität [GWh]	Max. Kapazität [GWh]2	Quelle (21.07.2022)
Samsung SDI	KOR	Ungarn	Göd	Produktion	2017		30	40	40	Samsung SDI expands battery production in Hungary - electrive.com
SK Innovation	KOR	Ungarn	Komárom 1	Produktion	2018	Batteriezellen	7,5	7,5	7,5	<a href="https://skonhungary.com/2021/07/04/sk-battery-hungary-turned-into-profit-last-year-with-remarkable-performance/">https://skonhungary.com/2021/07/04/sk-battery-hungary-turned-into-profit-last-year-with-remarkable-performance/</a>
SK Innovation	KOR	Ungarn	Komárom 2	Angekündigt	2022	Batteriezellen	9,8	9,8	9,8	<a href="https://skonhungary.com/2021/07/04/sk-battery-hungary-turned-into-profit-last-year-with-remarkable-performance/">https://skonhungary.com/2021/07/04/sk-battery-hungary-turned-into-profit-last-year-with-remarkable-performance/</a>
SK Innovation	KOR	Ungarn	Ivácna	Angekündigt	2028	Batteriezellen	30	30	30	<a href="https://skonhungary.com/2021/07/04/sk-battery-hungary-turned-into-profit-last-year-with-remarkable-performance/">https://skonhungary.com/2021/07/04/sk-battery-hungary-turned-into-profit-last-year-with-remarkable-performance/</a>
Svolt	VRC	Deutschland	Überherrn	Angekündigt	2023	Batteriezellen	6	24	24	<a href="https://svolt.eu.com/">https://svolt.eu.com/</a>
Tesla	US	Deutschland	Grünheide	Im Bau	2023	Batterietyp 4680, Batteriezellen			100	<a href="https://www.dw.com/en/teslas-first-european-gigafactory-opens-near-berlin/a-60006610">https://www.dw.com/en/teslas-first-european-gigafactory-opens-near-berlin/a-60006610</a>
VARTA	DEU	Deutschland		Angekündigt	2024	Batteriezellen			10	<a href="https://cicenergigune.com/en/blog/gigafactories-europe-commitment-economic-recovery-battery-factories">https://cicenergigune.com/en/blog/gigafactories-europe-commitment-economic-recovery-battery-factories</a>
Verkor	FRA	Frankreich	Dunkirk	Angekündigt	2023	Batteriezellen	16	50	50	<a href="https://www.innoenergy.com/news-events/verkor-europe-s-new-battery-cell-producer-begins-its-industrial-journey-backed-by-eit-innoenergy-schneider-electric-and-the-groupe-idcc/">https://www.innoenergy.com/news-events/verkor-europe-s-new-battery-cell-producer-begins-its-industrial-journey-backed-by-eit-innoenergy-schneider-electric-and-the-groupe-idcc/</a>
Volkswagen	DEU	Deutschland	Salzgitter	Angekündigt	2025	Batteriezellen	20	40	40	<a href="https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/grundsteinlegung-in-salzgitter-volkswagen-startet-mit-powerco-ins-globale-batteriegeschaefit-8050">https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/grundsteinlegung-in-salzgitter-volkswagen-startet-mit-powerco-ins-globale-batteriegeschaefit-8050</a> <a href="https://www.volkswagen.de/de/elektrofahrzeuge/elektromobilitaet-erleben/elektroauto-technologie/batteriezellenfabriken-neue-kapazitaeten-in-europa.html">https://www.volkswagen.de/de/elektrofahrzeuge/elektromobilitaet-erleben/elektroauto-technologie/batteriezellenfabriken-neue-kapazitaeten-in-europa.html</a> <a href="https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/09/battery-cell-assembly-pilot-line-started.html#">https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/09/battery-cell-assembly-pilot-line-started.html#</a> <a href="https://www.volkswagen-newsroom.com/de/volkswagen-ag-werk-salzgitter-6592">https://www.volkswagen-newsroom.com/de/volkswagen-ag-werk-salzgitter-6592</a> <a href="https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/volkswagen-konzern-und-gotion-high-tech-gehen-industrialisierung-von-batteriezellfertigung-in-deutschland-gemeinsam-an-7316">https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/volkswagen-konzern-und-gotion-high-tech-gehen-industrialisierung-von-batteriezellfertigung-in-deutschland-gemeinsam-an-7316</a>
Volkswagen	DEU	Europa	tbd	Angekündigt	2030	Batteriezellen	100	100	100	<a href="https://www.volkswagen.de/de/elektrofahrzeuge/elektromobilitaet-erleben/elektroauto-technologie/batteriezellenfabriken-neue-kapazitaeten-in-europa.html">https://www.volkswagen.de/de/elektrofahrzeuge/elektromobilitaet-erleben/elektroauto-technologie/batteriezellenfabriken-neue-kapazitaeten-in-europa.html</a>
Volkswagen/Seat	DEU	Spanien	Valencia	Angekündigt	2026	Batteriezellen	40	40	40	<a href="https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/volkswagen-konzern-und-seat-geben-elektrifizierungs-plaene-fuer-spanien-bekannt-7817">https://www.volkswagen-newsroom.com/de/pressemitteilungen/volkswagen-konzern-und-seat-geben-elektrifizierungs-plaene-fuer-spanien-bekannt-7817</a>

## 7.4 Alternative Lithiumfördermethoden

### 7.4.1 Lithium aus Bergbauwässern

Das Projekt MERLIN (mining water lithium extraction), ein Forschungsvorhaben des Leibniz Instituts für neue Materialien (INM) in Saarbrücken mit Unterstützung der RAG-Stiftung, widmet sich der Extraktion von Elementen wie Strontium, Barium oder Lithium aus den Grubenwässern in den ursprünglichen Steinkohlerevieren Ruhr und Saar. Für die Erforschung wird Grubenwasser aus zwei ehemaligen Bergwerken an der Saar verwendet (dpa, 2021). Die Konzentration von Lithium in den Grubenwässern ist mit 20 mg/l gering, allerdings werden im ehemaligen Saarrevier 18 Mio. m<sup>3</sup> Grubenwasser jährlich gepumpt, die ca. 1.900 t Lithium enthalten (Bertram, 2021; dpa, 2021). Im Labor wird das Grubenwasser durch eine Zelle mit zwei unterschiedlich geladenen Elektroden geschickt, so werden die Lithium- und Chlor-Ionen elektrochemisch extrahiert, anschließend wird die Zelle mit Frischwasser gespült (vgl. Slunitschek und Reich, 2022; RAG Stiftung, 2020). Das gewonnene Lithiumchlorid soll dann weiter aufbereitet werden (RAG Stiftung, 2020). Die Ressourcenverfügbarkeit von Lithium aus Grubenwässern in weiteren Ländern Europas soll im Rahmen des Projekts durch weitere geochemische Analysen untersucht werden (INM, 2020).

### 7.4.2 Lithium aus geförderten Lagerstättenwässern

Eine weitere innovative Möglichkeit der Lithiumgewinnung stellt die Extraktion aus geförderten Lagerstättenwässern neben der Öl- oder Gasförderung dar (McEachern, 2017; Kumar et al., 2019). Da bei der Förderung von Kohlenwasserstoffen abhängig vom Lagerstättentyp und -alter gleichzeitig auch Lagerstättenwässer mitgefördert werden, setzt sich das Produktionswasser aus den Lagerstättenwässern und der Injektionsflüssigkeit zusammen (Neff et al., 2011). In Deutschland wird im Norddeutschen Becken, u. a. aus Rotliegend- und Zechstein-Horizonten, Erdgas gefördert (LBEG, 2020). In eben diesen Horizonten wurden bei Tiefengewässeruntersuchungen Lithiumgehalte von durchschnittlich 58 mg/l gemessen (Stober et al., 2014). So nimmt Weißenborn an, dass aus den Erdgaslagerstätten des Rotliegend und Zechsteins in Deutschland jährlich ca. 300.000 m<sup>3</sup> Produktionswasser gefördert werden und hierdurch die Möglichkeit bestünde, Lithium zu gewinnen (Weißenborn, 2019). Das Formationswasser im Altmark Gasfeld in Sachsen-Anhalt weist eine Lithiumkonzentration von max. 357 mg/l auf (Lüders et al., 2010). In Produktionswässern aus ukrainischen Öl- und Gasfeldern wurden durchschnittlich zwischen 10 und 20 mg/l Lithium gemessen (Reva et al., 2021). Verschiedene Extraktionstechnologien, wie beispielweise Sorption mittels Ionenaustauschharzen oder Nanofiltration, wären für eine Lithiumextraktion aus diesen Wässern denkbar (vgl. Slunitschek und Reich, 2022; Kumar et al., 2019). Außerhalb von Europa, im US-Bundesstaat Pennsylvania, haben zwei Unternehmen die Absicht, als Joint Venture aus den Produktionswässern der Schiefergas-Förderung des Marcellus und Utica Shales Lithium zu extrahieren (Produced Water Society, 2021).

### 7.4.3 Lithium aus Meerwasser

Das von der Europäischen Union geförderte Projekt Sea4Value hat zum Ziel, bis 2024 ein modulares Solebergbauverfahren zu konzipieren, bei dem verschiedene Minerale und Metalle aus den Solen von Meerwasserentsalzungsanlagen durch Adsorptionsverfahren gewonnen werden können. 15 Einrichtungen entlang der kompletten Wertschöpfungskette sind daran beteiligt, darunter auch drei aus Deutschland (EU-Kommission, 2020d). Extrahiert werden sollen künftig Magnesium, Bor, Scandium, Indium, Vanadium, Gallium, Lithium, Rubidium sowie Molybdän zunächst aus Entsalzungsanlagen auf den Kanarischen Inseln sowie in Denia an der Mittelmeerküste Spaniens (EU-Recycling Magazin, 2021). Weltweit wird an verschiedenen Standorten an der Extraktion von Lithium aus Meerwasser geforscht, von Japan über Korea und Saudi-Arabien bis zu den USA (Chitrakar et al., 2001; Chung et al., 2004; Li et al., 2021; Diallo et al., 2015). Der Lithiumgehalt im Meerwasser variiert, in der Nordsee wurden Lithiumkonzentrationen von ca. 0,1 mg/l (0,1 ppm) gemessen, in japanischen Küstengewässern im Pazifik ca. 1,17 mg/l (1,173 ppm) (Choubey et al., 2017). Die Verfahren, die dabei am häufigsten angewendet werden, sind Adsorptionsverfahren, elektrochemische Verfahren oder Membran-Verfahren (vgl. Slunitschek und Reich, 2022; Xua et al., 2016; Liu et al., 2020; Li et al., 2021).

### 7.4.4 Lithium aus Salzlagerstätten

Lithiumvorkommen wurden auch im europäischen Becken in Salzlagerstätten in Norddeutschland in Gorleben und Morsleben mit max. 401 µg/g in Soleproben und 161 µg/g in Gesteinsproben gefunden (Mertineit und Schramm, 2019). Die größte Konzentration an Lithium wurde in den Solen der anhydritführenden Schichten mit einer Mächtigkeit von max. 80 m in Gorleben entdeckt (Mertineit und Schramm, 2019). Diese sind in ihrer Konzentration mit Vorkommen in Kalifornien, USA und Mexiko vergleichbar (Munk et al., 2016). Bereits in den 1960er-Jahren haben Untersuchungen von Salzlösungen aus dem deutschen Zechstein Lithium mit einer Konzentration max. 490 µg/g in Steinsalz nachgewiesen (Herrmann, 1961). Im Abbaugbiet Asse waren es durchschnittlich 6,61 mg/l (BGE, 2017). Welchen Ursprung das Lithium in den Salzlagerstätten in Gorleben und Morsleben hat, ist wissenschaftlich noch nicht belegt, Meerwasser als Quelle wird diskutiert, allerdings weist dieses geringere Lithium-Konzentrationen auf (Mertineit und Schramm, 2019).

## 7.5 Abnahmevereinbarungen

**Tabelle 7.3:** Übersicht der Abnahmevereinbarungen für europäisches Lithium (nach Savannah Resources Plc, 2021a; Infinity Lithium, 2022; Vulcan Energy Resources, 2021a, b, c, d, 2022c).

Unternehmen	Vertragspartner	Vereinbarungsart	Bereich	Vertragsvolumen	Vertragsstart	Vertragslaufzeit [a]	Ankündigung
European Lithium	BMW Group	MoU	Automobilhersteller	100 % des produzierten Lithiumhydroxid Monohydrats	k. A.	k. A.	05.08.2022
Infinity Lithium	LG Energy Solutions	MoU	Batteriezellen	k. A.	k. A.	k. A.	22.06.2022
Savannah Resources	Galp Energia	Offtake Agreement	Energie	100.000 t/a (50 % der Jahresproduktion)	k. A.	k. A.	12.01.2021
VER	LG Energy Solutions	Binding offtake agreement	Batteriezellen	41.000-50.000	2025	5-10	31.01.2022
VER	Renault	Binding offtake agreement	Automobilhersteller	26.000-32.000	2026	6	22.11.2021
VER	Stellantis	Binding offtake agreement	Automobilhersteller	81.000-99.000	2026	5	29.11.2021
VER	Umicore	Binding offtake agreement	Kathodenproduzent	28.000-42.000	2025	5	18.10.2021
VER	Volkswagen Group	Binding offtake agreement	Automobilhersteller	34.000-42.000	2026	5	08.12.2021

## 7.6 Abnahmemengen von Vulcan Energie Ressourcen

**Tabelle 7.4:** Übersicht Abnahmeverträge der Vulcan Energie Ressourcen GmbH (nach VER, 2021a, b, c, d, 2022c).

Vertragspartner	Start Abnahme	Vorläufige Vertragslaufzeit	Mindestabnahmemenge in t LiOH * H <sub>2</sub> O	Min t LiOH * H <sub>2</sub> O im Jahr	Anteilig an der jährlichen Gesamtabnahmemenge	Min t LCE im Jahr	Maximale Abnahmemenge in t LiOH * H <sub>2</sub> O	Max t LiOH * H <sub>2</sub> O im Jahr	Anteilig an der jährlichen Gesamtabnahmemenge	Max t LCE im Jahr	MW LCE in t im Jahr
LG	2025	5	41.000	8.200	19,9 %	7.216	50.000	10.000	19,3 %	8.800	8.008
Renault	2026	6	26.000	4.333	10,5 %	3.813	32.000	5.333	10,3 %	4.693	4.253
Stellantis	2026	5	81.000	16.200	39,4 %	14.256	99.000	19.800	38,1 %	17.424	15.840
Umicore	2025	5	28.000	5.600	13,6 %	4.928	42.000	8.400	16,2 %	7.392	6.160
VW	2026	5	34.000	6.800	16,5 %	5.984	42.000	8.400	16,2 %	7.392	6.688
<b>Summe</b>				<b>41.133</b>	<b>55,9 %</b>	<b>36.197</b>		<b>51.933</b>		<b>45.701</b>	<b>40.949</b>

## 7.7 Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Grundfall

**Tabelle 7.5:** Kalkulierter Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Grundfall. Grün hinterlegt sind die Szenarien, bei denen die geringsten Mengen auf dem außereuropäischen Markt nachgefragt werden müssen, grau hinterlegt sind die Szenarien, die die höchsten Mengen erfordern.

Batterie- zellenpro- duktions- szenario	Szenario der Nachfrage am außereuro- päischen Markt	Lithium- bedarf t LCE	EU-27 Primärlithiumangebot			Europäisches Sekundärlithiumangebot			Bedarf vom außereuro- päischen Markt	
			Szenario		t LCE	Szenario		t LCE	t LCE	t Lithium
Mindest- Szenario S1 112,62 GWh	I1	60.361	P11	0,0 %	0	R11	0,0 %	0	60.361	11.348
	I2					R21	2,5 %	1.509	58.852	11.064
	I3					R31	4,0 %	2.414	57.947	10.894
	I4		P21	3,6 %	2.758	R11	0,0 %	0	57.604	10.829
	I5					R21	2,5 %	1.509	56.095	10.546
	I6					R31	4,0 %	2.414	55.189	10.376
	I7		P31	13,6 %	10.393	R11	0,0 %	0	49.969	9.394
	I8					R21	2,5 %	1.509	48.460	9.110
	I9					R31	4,0 %	2.414	47.554	8.940
Mittel- Szenario S2 207,1 GWh	I10	111.000	P12	0,0 %	0	R12	0,0 %	0	111.000	20.868
	I11					R22	2,5 %	2.775	108.225	20.346
	I12					R32	4,0 %	4.440	106.560	20.033
	I13		P22	13,7 %	10.460	R12	0,0 %	0	100.540	18.902
	I14					R22	2,5 %	2.775	97.765	18.380
	I15					R32	4,0 %	4.440	96.100	18.067
	I16		P32	25,0 %	19.111	R12	0,0 %	0	91.889	17.275
	I17					R22	2,5 %	2.775	89.114	16.753
I18	R32	4,0 %				4.440	87.449	16.440		
Maximum- Szenario S3 323,1 GWh	I19	173.173	P13	0,0 %	0	R13	0,0 %	0	173.173	32.556
	I20					R23	2,5 %	4.329	168.844	31.743
	I21					R33	4,0 %	6.927	166.246	31.254
	I22		P23	15,1 %	11.537	R13	0,0 %	0	161.636	30.388
	I23					R23	2,5 %	4.329	157.306	29.574
	I24					R33	4,0 %	6.927	154.709	29.085
	I25		P33	21,0 %	16.092	R13	0,0 %	0	157.081	29.531
	I26					R23	2,5 %	4.329	152.752	28.717
I27	R33	4,0 %				6.927	150.154	28.229		

## 7.8 Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall

**Tabelle 7.6:** Kalkulierter Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall. Grün hinterlegt sind die Szenarien, bei denen die geringsten Mengen auf dem außereuropäischen Markt nachgefragt werden müssen, grau hinterlegt sind die Szenarien, die die höchsten Mengen erfordern.

Batterie- zellenpro- duktions- szenario	Szenario der Nachfrage am außereuro- päischen Markt	Lithium- bedarf t LCE	EU-27 Primärlithiumangebot			Europäisches Sekundärlithiumangebot			Bedarf vom außereuro- päischen Markt	
			Szenario		t LCE	Szenario		t LCE	t LCE	t Lithium
Mindest- Szenario S1 88,1 GWh	I1	47.200	P11	0,0 %	0	R11	0,0 %	0	47.234	8.880
	I2					R21	2,5 %	1.181	46.053	8.658
	I3					R31	4,0 %	1.889	45.345	8.525
	I4		P21	3,6 %	2.758	R11	0,0 %	0	44.477	8.362
	I5					R21	2,5 %	1.181	43.296	8.140
	I6					R31	4,0 %	1.889	42.587	8.006
	I7		P31	13,6 %	10.393	R11	0,0 %	0	36.842	6.926
	I8					R21	2,5 %	1.181	35.661	6.704
	I9					R31	4,0 %	1.889	34.952	6.571
Mittel- Szenario S2 169,7 GWh	I10	91.000	P12	0,0 %	0	R12	0,0 %	0	90.947	17.098
	I11					R22	2,5 %	2.274	88.673	16.671
	I12					R32	4,0 %	3.638	87.309	16.414
	I13		P22	13,7 %	10.460	R12	0,0 %	0	80.487	15.132
	I14					R22	2,5 %	2.274	78.213	14.704
	I15					R32	4,0 %	3.638	76.849	14.448
	I16		P32	25,0 %	19.111	R12	0,0 %	0	71.836	13.505
	I17					R22	2,5 %	2.274	69.562	13.078
I18	R32	4,0 %				3.638	68.198	12.821		
Maximum- Szenario S3 285,7 GWh	I19	153.100	P13	0,0 %	0	R13	0,0 %	0	153.120	28.787
	I20					R23	2,5 %	3.828	149.292	28.067
	I21					R33	4,0 %	6.125	146.995	27.635
	I22		P23	15,1 %	11.537	R13	0,0 %	0	141.583	26.618
	I23					R23	2,5 %	3.828	137.755	25.898
	I24					R33	4,0 %	6.125	135.458	25.466
	I25		P33	21,0 %	16.092	R13	0,0 %	0	137.028	25.761
	I26					R23	2,5 %	3.828	133.200	25.042
I27	R33	4,0 %				6.125	130.903	24.610		

## 7.9 Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Grundfall – Sensitivität 1

**Tabelle 7.7:** Kalkulierter Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Grundfall der Sensitivität 1. Grün hinterlegt sind die Szenarien, bei denen die geringsten Mengen auf dem außereuropäischen Markt nachgefragt werden müssen, grau hinterlegt sind die Szenarien, die die höchsten Mengen erfordern.

Batterie- zellenpro- duktions- szenario	Szenario der Nachfrage am außereuro- päischen Markt	Lithium- bedarf t LCE	EU-27 Primärlithiumangebot			Europäisches Sekundärlithiumangebot			Bedarf vom außereuro- päischen Markt	
			Szenario		t LCE	Szenario		t LCE	t LCE	t Lithium
Mindest- Szenario S1 112,62 GWh	I1	57.343	P11	0,0 %	0	R11	0,0 %	0	57.343	10.781
	I2					R21	2,5 %	1.434	55.910	10.511
	I3					R31	4,0 %	2.294	55.049	10.349
	I4		P21	3,6 %	2.758	R11	0,0 %	0	54.586	10.262
	I5					R21	2,5 %	1.434	53.152	9.993
	I6					R31	4,0 %	2.294	52.292	9.831
	I7		P31	13,6 %	10.393	R11	0,0 %	0	46.951	8.827
	I8					R21	2,5 %	1.434	45.517	8.557
	I9					R31	4,0 %	2.294	44.657	8.395
Mittel- Szenario S2 207,1 GWh	I10	105.450	P12	0,0 %	0	R12	0,0 %	0	105.450	19.825
	I11					R22	2,5 %	2.636	102.814	19.329
	I12					R32	4,0 %	4.218	101.232	19.032
	I13		P22	13,7 %	10.460	R12	0,0 %	0	94.990	17.858
	I14					R22	2,5 %	2.636	92.354	17.362
	I15					R32	4,0 %	4.218	90.772	17.065
	I16		P32	25,0 %	19.111	R12	0,0 %	0	86.339	16.232
	I17					R22	2,5 %	2.636	83.702	15.736
I18	R32	4,0 %				4.218	82.121	15.439		
Maximum- Szenario S3 323,1 GWh	I19	164.514	P13	0,0 %	0	R13	0,0 %	0	164.514	30.929
	I20					R23	2,5 %	4.113	160.401	30.155
	I21					R33	4,0 %	6.581	157.934	29.692
	I22		P23	15,1 %	11.537	R13	0,0 %	0	152.977	28.760
	I23					R23	2,5 %	4.113	148.864	27.986
	I24					R33	4,0 %	6.581	146.397	27.523
	I25		P33	21,0 %	16.092	R13	0,0 %	0	148.422	27.903
	I26					R23	2,5 %	4.113	144.309	27.130
I27	R33	4,0 %				6.581	141.842	26.666		

## 7.10 Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall – Sensitivität 1

**Tabelle 7.8:** Kalkulierter Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall der Sensitivität 1. Grün hinterlegt sind die Szenarien, bei denen die geringsten Mengen auf dem außereuropäischen Markt nachgefragt werden müssen, grau hinterlegt sind die Szenarien, die die höchsten Mengen erfordern.

Batterie- zellenpro- duktions- szenario	Szenario der Nachfrage am außereuro- päischen Markt	Lithium- bedarf t LCE	EU-27 Primärlithiumangebot			Europäisches Sekundärlithiumangebot			Bedarf vom außereuro- päischen Markt	
			Szenario		t LCE	Szenario		t LCE	t LCE	t Lithium
Mindest- Szenario S1 88,1 GWh	I1	44.873	P11	0,0 %	0	R11	0,0 %	0	44.873	8.436
	I2					R21	2,5 %	1.122	43.751	8.225
	I3					R31	4,0 %	1.795	43.078	8.099
	I4		P21	3,6 %	2.758	R11	0,0 %	0	42.115	7.918
	I5					R21	2,5 %	1.122	40.993	7.707
	I6					R31	4,0 %	1.795	40.320	7.580
	I7		P31	13,6 %	10.393	R11	0,0 %	0	34.480	6.482
	I8					R21	2,5 %	1.122	33.358	6.271
	I9					R31	4,0 %	1.795	32.685	6.145
Mittel- Szenario S2 169,7 GWh	I10	86.400	P12	0,0 %	0	R12	0,0 %	0	86.400	16.243
	I11					R22	2,5 %	2.160	84.240	15.837
	I12					R32	4,0 %	3.456	82.944	15.593
	I13		P22	13,7 %	10.460	R12	0,0 %	0	75.940	14.277
	I14					R22	2,5 %	2.160	73.780	13.871
	I15					R32	4,0 %	3.456	72.484	13.627
	I16		P32	25,0 %	19.111	R12	0,0 %	0	67.288	12.650
	I17					R22	2,5 %	2.160	65.128	12.244
I18	R32	4,0 %				3.456	63.832	12.000		
Maximum- Szenario S3 285,7 GWh	I19	145.464	P13	0,0 %	0	R13	0,0 %	0	145.464	27.347
	I20					R23	2,5 %	3.637	141.827	26.664
	I21					R33	4,0 %	5.819	139.645	26.253
	I22		P23	15,1 %	11.537	R13	0,0 %	0	133.927	25.178
	I23					R23	2,5 %	3.637	130.290	24.495
	I24					R33	4,0 %	5.819	128.108	24.084
	I25		P33	21,0 %	16.092	R13	0,0 %	0	129.372	24.322
	I26					R23	2,5 %	3.637	125.735	23.638
I27	R33	4,0 %				5.819	123.553	23.228		

## 7.11 Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Grundfall – Sensitivität 2

**Tabelle 7.9:** Kalkulierter Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Grundfall der Sensitivität 2. Grün hinterlegt sind die Szenarien, bei denen die geringsten Mengen auf dem außereuropäischen Markt nachgefragt werden müssen, grau hinterlegt sind die Szenarien, die die höchsten Mengen erfordern.

Batterie- zellenpro- duktions- szenario	Szenario der Nachfrage am außereuro- päischen Markt	Lithium- bedarf t LCE	EU-27 Primärlithiumangebot			Europäisches Sekundärlithiumangebot			Bedarf vom außereuro- päischen Markt	
			Szenario		t LCE	Szenario		t LCE	t LCE	t Lithium
Mindest- Szenario S1 112,62 GWh	I1	55.532	P11	0,0 %	0	R11	0,0 %	0	55.532	10.440
	I2					R21	2,5 %	1.388	54.144	10.179
	I3					R31	4,0 %	2.221	53.311	10.022
	I4		P21	3,6 %	2.758	R11	0,0 %	0	52.775	9.922
	I5					R21	2,5 %	1.388	51.386	9.661
	I6					R31	4,0 %	2.221	50.553	9.504
	I7		P31	13,6 %	10.393	R11	0,0 %	0	45.140	8.486
	I8					R21	2,5 %	1.388	43.751	8.225
	I9					R31	4,0 %	2.221	42.918	8.069
Mittel- Szenario S2 207,1 GWh	I10	102.120	P12	0,0 %	0	R12	0,0 %	0	102.120	19.199
	I11					R22	2,5 %	2.553	99.567	18.719
	I12					R32	4,0 %	4.085	98.035	18.431
	I13		P22	13,7 %	10.460	R12	0,0 %	0	91.660	17.232
	I14					R22	2,5 %	2.553	89.107	16.752
	I15					R32	4,0 %	4.085	87.575	16.464
	I16		P32	25,0 %	19.111	R12	0,0 %	0	83.009	15.606
	I17					R22	2,5 %	2.553	80.456	15.126
I18	R32	4,0 %				4.085	78.924	14.838		
Maximum- Szenario S3 323,1 GWh	I19	159.319	P13	0,0 %	0	R13	0,0 %	0	159.319	29.952
	I20					R23	2,5 %	3.983	155.336	29.203
	I21					R33	4,0 %	6.373	152.946	28.754
	I22		P23	15,1 %	11.537	R13	0,0 %	0	147.782	27.783
	I23					R23	2,5 %	3.983	143.799	27.034
	I24					R33	4,0 %	6.373	141.409	26.585
	I25		P33	21,0 %	16.092	R13	0,0 %	0	143.227	26.927
	I26					R23	2,5 %	3.983	139.244	26.178
I27	R33	4,0 %				6.373	136.854	25.729		

## 7.12 Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall – Sensitivität 2

**Tabelle 7.10:** Kalkulierter Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall der Sensitivität 2. Grün hinterlegt sind die Szenarien, bei denen die geringsten Mengen auf dem außereuropäischen Markt nachgefragt werden müssen, grau hinterlegt sind die Szenarien, die die höchsten Mengen erfordern.

Batterie- zellenpro- duktions- szenario	Szenario der Nachfrage am außereuro- päischen Markt	Lithium- bedarf t LCE	EU-27 Primärlithiumangebot			Europäisches Sekundärlithiumangebot			Bedarf vom außereuro- päischen Markt	
			Szenario		t LCE	Szenario		t LCE	t LCE	t Lithium
Mindest- Szenario S1 88,1 GWh	I1	43.456	P11	0,0 %	0	R11	0,0 %	0	43.456	8.170
	I2					R21	2,5 %	1.086	42.369	7.965
	I3					R31	4,0 %	1.738	41.717	7.843
	I4		P21	3,6 %	2.758	R11	0,0 %	0	40.698	7.651
	I5					R21	2,5 %	1.086	39.612	7.447
	I6					R31	4,0 %	1.738	38.960	7.324
	I7		P31	13,6 %	10.393	R11	0,0 %	0	33.063	6.216
	I8					R21	2,5 %	1.086	31.977	6.012
	I9					R31	4,0 %	1.738	31.325	5.889
Mittel- Szenario S2 169,7 GWh	I10	83.671	P12	0,0 %	0	R12	0,0 %	0	83.671	15.730
	I11					R22	2,5 %	2.092	81.579	15.337
	I12					R32	4,0 %	3.347	80.324	15.101
	I13		P22	13,7 %	10.460	R12	0,0 %	0	73.211	13.764
	I14					R22	2,5 %	2.092	71.119	13.370
	I15					R32	4,0 %	3.347	69.864	13.134
	I16		P32	25,0 %	19.111	R12	0,0 %	0	64.560	12.137
	I17					R22	2,5 %	2.092	62.468	11.744
I18	R32	4,0 %				3.347	61.213	11.508		
Maximum- Szenario S3 285,7 GWh	I19	140.870	P13	0,0 %	0	R13	0,0 %	0	140.870	26.484
	I20					R23	2,5 %	3.522	137.348	25.822
	I21					R33	4,0 %	5.635	135.235	25.424
	I22		P23	15,1 %	11.537	R13	0,0 %	0	129.333	24.315
	I23					R23	2,5 %	3.522	125.811	23.653
	I24					R33	4,0 %	5.635	123.698	23.255
	I25		P33	21,0 %	16.092	R13	0,0 %	0	124.778	23.458
	I26					R23	2,5 %	3.522	121.257	22.796
I27	R33	4,0 %				5.635	119.143	22.399		

## 7.13 Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Grundfall – Sensitivität 3

**Tabelle 7.11:** Kalkulierter Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Grundfall der Sensitivität 3. Grün hinterlegt sind die Szenarien, bei denen die geringsten Mengen auf dem außereuropäischen Markt nachgefragt werden müssen, grau hinterlegt sind die Szenarien, die die höchsten Mengen erfordern.

Batterie- zellenpro- duktions- szenario	Szenario der Nachfrage am außereuro- päischen Markt	Lithium- bedarf t LCE	EU-27 Primärlithiumangebot			Europäisches Sekundärlithiumangebot			Bedarf vom außereuro- päischen Markt	
			Szenario		t LCE	Szenario		t LCE	t LCE	t Lithium
Mindest- Szenario S1 112,62 GWh	I1	55.532	P11	0,0 %	0	R11	2,5 %	1.388	54.144	10.179
	I2					R21	4,0 %	2.221	53.311	10.022
	I3					R31	10,6 %	5.886	49.646	9.333
	I4		P21	3,6 %	2.758	R11	2,5 %	1.388	51.386	9.661
	I5					R21	4,0 %	2.221	50.553	9.504
	I6					R31	10,6 %	5.886	46.888	8.815
	I7		P31	13,6 %	10.393	R11	2,5 %	1.388	43.751	8.225
	I8					R21	4,0 %	2.221	42.918	8.069
	I9					R31	10,6 %	5.886	39.253	7.380
Mittel- Szenario S2 207,1 GWh	I10	102.120	P12	0,0 %	0	R12	2,5 %	2.553	99.567	18.719
	I11					R22	4,0 %	4.085	98.035	18.431
	I12					R32	10,6 %	10.825	91.295	17.164
	I13		P22	13,7 %	10.460	R12	2,5 %	2.553	89.107	16.752
	I14					R22	4,0 %	4.085	87.575	16.464
	I15					R32	10,6 %	10.825	80.835	15.197
	I16		P32	25,0 %	19.111	R12	2,5 %	2.553	80.456	15.126
	I17					R22	4,0 %	4.085	78.924	14.838
I18	R32	10,6 %				10.825	72.184	13.571		
Maximum- Szenario S3 323,1 GWh	I19	159.319	P13	0,0 %	0	R13	2,5 %	3.983	155.336	29.203
	I20					R23	4,0 %	6.373	152.946	28.754
	I21					R33	10,6 %	16.888	142.431	26.777
	I22		P23	15,1 %	11.537	R13	2,5 %	3.983	143.799	27.034
	I23					R23	4,0 %	6.373	141.409	26.585
	I24					R33	10,6 %	16.888	130.894	24.608
	I25		P33	21,0 %	16.092	R13	2,5 %	3.983	139.244	26.178
	I26					R23	4,0 %	6.373	136.854	25.729
I27	R33	10,6 %				16.888	126.339	23.752		

## 7.14 Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall – Sensitivität 3

**Tabelle 7.12:** Kalkulierter Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall der Sensitivität 3. Grün hinterlegt sind die Szenarien, bei denen die geringsten Mengen auf dem außereuropäischen Markt nachgefragt werden müssen, grau hinterlegt sind die Szenarien, die die höchsten Mengen erfordern.

Batterie- zellenpro- duktions- szenario	Szenario der Nachfrage am außereuro- päischen Markt	Lithium- bedarf t LCE	EU-27 Primärlithiumangebot			Europäisches Sekundärlithiumangebot			Bedarf vom außereuro- päischen Markt	
			Szenario		t LCE	Szenario		t LCE	t LCE	t Lithium
Mindest- Szenario S1 88,1 GWh	I1	43.456	P11	0,0 %	0	R11	2,5 %	1.086	42.369	7.965
	I2					R21	4,0 %	1.738	41.717	7.843
	I3					R31	10,6 %	4.606	38.849	7.304
	I4		P21	3,6 %	2.758	R11	2,5 %	1.086	39.612	7.447
	I5					R21	4,0 %	1.738	38.960	7.324
	I6					R31	10,6 %	4.606	36.092	6.785
	I7		P31	13,6 %	10.393	R11	2,5 %	1.086	31.977	6.012
	I8					R21	4,0 %	1.738	31.325	5.889
	I9					R31	10,6 %	4.606	28.457	5.350
Mittel- Szenario S2 169,7 GWh	I10	83.671	P12	0,0 %	0	R12	2,5 %	2.092	81.579	15.337
	I11					R22	4,0 %	3.347	80.324	15.101
	I12					R32	10,6 %	8.869	74.802	14.063
	I13		P22	13,7 %	10.460	R12	2,5 %	2.092	71.119	13.370
	I14					R22	4,0 %	3.347	69.864	13.134
	I15					R32	10,6 %	8.869	64.342	12.096
	I16		P32	25,0 %	19.111	R12	2,5 %	2.092	62.468	11.744
	I17					R22	4,0 %	3.347	61.213	11.508
I18	R32	10,6 %				8.869	55.691	10.470		
Maximum- Szenario S3 285,7 GWh	I19	140.870	P13	0,0 %	0	R13	2,5 %	3.522	137.348	25.822
	I20					R23	4,0 %	5.635	135.235	25.424
	I21					R33	10,6 %	14.932	125.938	23.676
	I22		P23	15,1 %	11.537	R13	2,5 %	3.522	125.811	23.653
	I23					R23	4,0 %	5.635	123.698	23.255
	I24					R33	10,6 %	14.932	114.401	21.507
	I25		P33	21,0 %	16.092	R13	2,5 %	3.522	121.257	22.796
	I26					R23	4,0 %	5.635	119.143	22.399
I27	R33	10,6 %				14.932	109.846	20.651		

## 7.15 Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030

**Tabelle 7.13:** Kalkulierter Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall der Sensitivität 3. Grün hinterlegt sind die Szenarien, bei denen die geringsten Mengen auf dem außereuropäischen Markt nachgefragt werden müssen, grau hinterlegt sind die Szenarien, die die höchsten Mengen erfordern.

Annahme/ Berechnung	Batteriezellen- produktions- kapazität angepasst	Nachfrageszenario am außereuropäischen Markt	Lithiumbedarf	Europäisches Primärlithiumangebot		Europäisches Sekundärlithiumangebot			Bedarf vom außereuropäischen Markt		
				Fall	t LCE	Fall	t LCE	t LCE	t Lithium		
Einheit	GWh		t LCE								
Mindest- Szenario S1	828,7	I1	444.145	P11	100,0 %	133.567	R11	0,0 %	0	310.578	58.389
		R21					2,5 %	11.104	299.474	56.301	
		R31					4,0 %	17.766	292.812	55.049	
Mittel- Szenario S2	1.419,4	I4	760.760	P12	100,0 %	133.567	R12	0,0 %	0	627.193	117.912
		R22					2,5 %	19.019	608.174	114.337	
		R32					4,0 %	30.430	596.762	112.191	
Maximum- Szenario S3	1.535,4	I7	822.933	P13	100,0 %	133.567	R13	0,0 %	0	689.366	129.601
		R23					2,5 %	20.573	668.792	125.733	
		R33					4,0 %	32.917	656.448	123.412	

## 7.16 Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Europa im Jahr 2030 – Sensitivitäten 1-3

**Tabelle 7.14:** Kalkulierter Lithiumbedarf am außereuropäischen Markt für die Batteriezellenproduktion in Deutschland im Jahr 2030 im Praxisfall der Sensitivität 3. Grün hinterlegt sind die Szenarien, bei denen die geringsten Mengen auf dem außereuropäischen Markt nachgefragt werden müssen, grau hinterlegt sind die Szenarien, die die höchsten Mengen erfordern.

Batteriezellen- produktions- kapazität	Sensitivität	Nachfrageszenario am außereuropäischen Markt	Lithiumbedarf		Europäisches Primärlithiumangebot		Europäisches Sekundärlithiumangebot			Bedarf vom außereuropäischen Markt	
			t LCE	Fall	t LCE	Fall	t LCE	t LCE	t Lithium		
Mindest- Szenario S1 828,7 GWh	1	I1	421.937	P11	100,0 %	133.567	R11	0,0 %	0	288.370	54.214
		I2					R21	2,5 %	10.548	277.822	52.231
		I3					R31	4,0 %	16.877	271.493	51.041
	2	I1	408.613	P11	100,0 %	133.567	R11	0,0 %	0	275.046	51.709
		I2					R21	2,5 %	10.215	264.831	49.788
		I3					R31	4,0 %	16.345	258.701	48.636
	3	I1	408.613	P11	100,0 %	133.567	R11	2,5 %	10.215	264.831	49.788
		I2					R21	4,0 %	16.345	258.701	48.636
		I3					R31	10,6 %	43.313	231.733	43.566
Mittel- Szenario S2 1.419,4 GWh	1	I4	722.722	P12	100,0 %	133.567	R12	0,0 %	0	589.155	110.761
		I5					R22	2,5 %	18.068	571.087	107.364
		I6					R32	4,0 %	31.271	557.883	104.882
	2	I4	699.899	P12	100,0 %	133.567	R12	0,0 %	0	566.332	106.470
		I5					R22	2,5 %	17.497	548.835	103.181
		I6					R32	4,0 %	27.996	538.336	101.207
	3	I4	699.899	P12	100,0 %	133.567	R12	2,5 %	17.497	548.835	103.181
		I5					R22	4,0 %	27.996	538.336	101.207
		I6					R32	10,6 %	74.189	492.143	92.523
Maximum- Szenario S3 1.535,4 GWh	1	I7	781.786	P13	100,0 %	133.567	R13	0,0 %	0	648.219	121.865
		I8					R23	2,5 %	19.545	628.674	118.191
		I9					R33	4,0 %	31.271	616.948	115.986
	2	I7	757.098	P13	100,0 %	133.567	R13	0,0 %	0	623.531	117.224
		I8					R23	2,5 %	18.927	604.604	113.665
		I9					R33	4,0 %	30.284	593.247	111.530
	3	I7	757.098	P13	100,0 %	133.567	R13	2,5 %	18.927	604.604	113.665
		I8					R23	4,0 %	30.284	593.247	111.530
		I9					R33	10,6 %	80.252	543.279	102.136

## 7.17 Klima-, Energie- und Industrieziele in Deutschland

Die Reduktion der Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen<sup>26</sup>) war in Deutschland im Jahr 2019 (793 Mio. t CO<sub>2</sub>äquiv.) um 37,9 % geringer als im Vergleichsjahr 1990 (1.273 Mio. t CO<sub>2</sub>äquiv.) (BMWK, 2022). Im § 3 des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) 2021 ist festgeschrieben, dass im Jahr 2030 die Reduktion der THG-Emission 65 % i. V. z. 1990 betragen soll. Weiter sind gemäß § 3 KSG im Jahr 2040 88 %, 2045 eine Netto-Treibhausgasneutralität und 2050 negative Emissionen zu erreichen.

Der Primärenergieverbrauch<sup>27</sup> Deutschlands beruhte 2019 zu 77,9 % auf Kohlenwasserstoffen (Erdgas 25,1 %, Erdöl 35,2 %, Kohle 17,5 %) (2.770 TWh, Abb. 7.1), 73,8 % der Kohlenwasserstoffe und nuklearen Primärenergie Deutschlands wurden importiert (BMWK, 2022). Deutschland hatte 2019 (3.557 TWh) einen 14,1 % geringeren Primärenergieverbrauch i. V. z. 1990 (4.140 TWh), der Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch stieg von 1990 von 1,3 % (55 TWh) auf 14,9 % (529 TWh) in 2019 an (BMWK, 2022).

Der Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch<sup>28</sup> lag 2019 bei 17,7 % (457 TWh von 2.493 TWh) (Abb. 7.1, BMWK, 2022a). Der Nationale Energie- und Klimaplan aus dem Jahr 2020 legt fest, dass bis 2030 die Erneuerbaren Energien 30 % am Endenergieverbrauch ausmachen sollen (Bundesregierung, 2020). Der Endenergieverbrauch teilte sich im Jahr 2019 (2.493 TWh) zu 30,3 % auf den Verkehr, zu 29,1 % auf die Industrie, zu 26 % auf die Haushalte und zu 14,6 % auf Gewerbe, Handel und Dienstleistungen auf (BMWK, 2022). Der Anteil der Erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch der Industrie erzielte 2019 4,5 % (31 TWh) (BMWK, 2022).

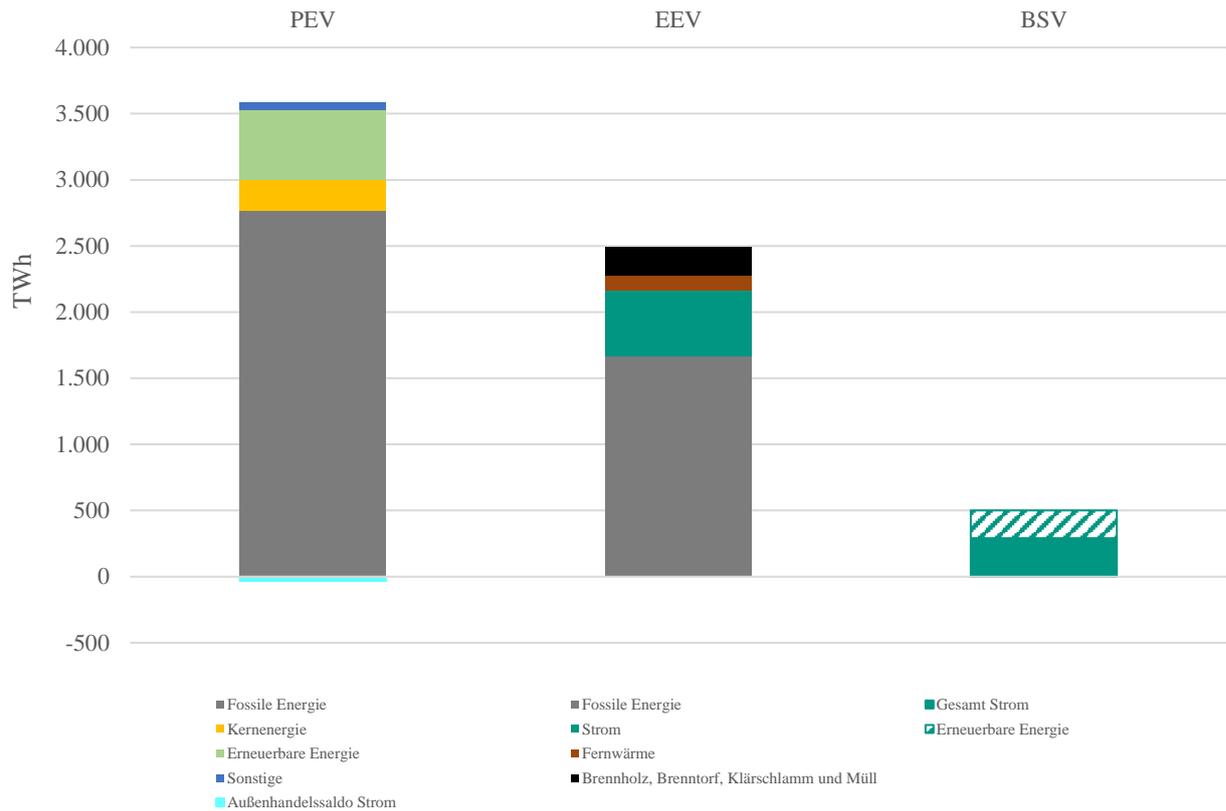
Im Jahr 2019 wurden 41,8 % (209,2 TWh) des Bruttostromverbrauchs<sup>29</sup> (500 TWh) aus Erneuerbaren Energien generiert (Abb. 7.1, BMWK, 2022). Der Anteil der Erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung lag im Jahr 2019 bei 39,6 % (240 TWh von 607 TWh, Abb. 7.2, BMWK, 2022). Nachdem im Klimaschutzprogramm von 2019 festgehalten wurde, dass im Jahr 2030 65 % des Bruttostromverbrauchs aus Erneuerbaren Energien gewonnen werden sollen (Bundesregierung, 2019), wurden von der Bundesregierung im Frühjahr 2022 verschiedene Gesetze im Rahmen des Energiesofortmaßnahmenpakets („Osterpaket“) angepasst. So auch das EEG 2023 (Erneuerbare-Energien-Gesetz), welches in § 1 vorsieht, dass der Anteil der Erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch im Jahr 2030 80 % betragen soll.

<sup>26</sup> Treibhausgase: Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>O), wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC), Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>), Stickstofftrifluorid (NF<sub>3</sub>).

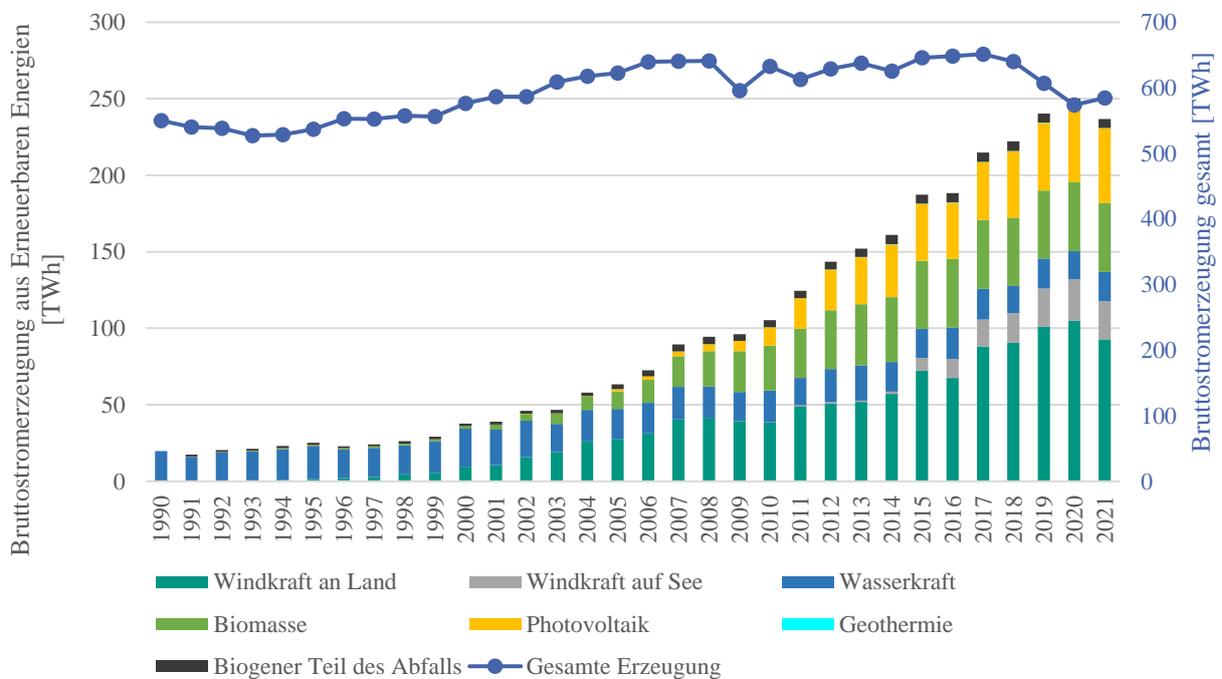
<sup>27</sup> Primärenergieverbrauch: Der Energiegehalt aller im Inland eingesetzten Energieträger (UBA, 2022).

<sup>28</sup> Endenergieverbrauch: Vom Primärenergieverbrauch werden die Umwandlungs- und Übertragungsverluste der Primärenergieträger wie z. B. Braunkohlen, Steinkohlen, Erdöl, Erdgas abgezogen, die Primärenergie wird „in eine Form umgewandelt, die der Verbraucher nutzen kann, z. B. Strom, Wärme oder Kraftstoffe.“ (UBA, 2022a).

<sup>29</sup> Bruttostromverbrauch: Stellt den „Endenergieverbrauch an Strom sowie die damit einhergehenden Umwandlungs- und Übertragungsverluste“ dar (UBA, 2022a).



**Abbildung 7.1:** Darstellung des Primärenergieverbrauchs (PEV), des Endenergieverbrauchs (EEV) und des Bruttostromverbrauchs (BSV) [1 TWh = 3,6 PJ] im Jahr 2019 in Deutschland (nach BMWK, 2022).



**Abbildung 7.2:** Entwicklung der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien sowie der gesamten deutschen Energieerzeugung, inkl. Kohle, Erdgas, Erdöl und Kernkraft, in den Jahren 1990–2021 (nach BMWK, 2022).

Die erneute Novelle des EEG sieht auch vor, bis zum Jahr 2030 die Windkraftleistung an Land auf 115 GW, auf See auf 30 GW und die Photovoltaik auf 215 GW auszubauen (Bundesregierung,

2022; § 4 EEG 2023). Die installierte Windkraftleistung an Land lag im Jahr 2019 bei 53,2 GW, auf See bei 7,6 GW, aus der Photovoltaik waren 48,9 GW installiert (BMWK, 2022a).

In der deutschen Wasserstoffstrategie wurde festgelegt, dass die Elektrolysekapazität in Deutschland im Jahr 2030 5 GW betragen soll (Bundesregierung, 2020a). Im Juni 2022 hat die Bundesregierung bekannt gegeben, dass die angestrebte Elektrolysekapazität 2030 in Deutschland auf 10 GW erhöht werden soll (Bundesregierung, 2022). Im Jahr 2022 konnten in Deutschland 0,17 MW Elektrolyseurkapazität verzeichnet werden (pers. com. acatech, 2022).

Der Beitrag der Industrie<sup>30</sup> zur Bruttowertschöpfung lag im Jahr 2019 bei 25 % und 2021 bei 24 % (Destatis, 2022a). Ein weiteres Ziel für das Jahr 2030 ist gemäß der Industriestrategie der Bundesregierung (2019) der Beitrag der Industrie zur Bruttowertschöpfung (BWS) von 25 % (Tab. 7.15). Hieraus ergibt sich mit den Klimazielen der Bundesregierung die Notwendigkeit der stofflichen Nutzung von Wasserstoff in industriellen Prozessen und der dazu notwendige Ausbau von Elektrolyseuren mit einhergehendem Rohstoffbedarf.

**Tabelle 7.15:** Übersicht der Klima-, Energie- und Industrieziele in Deutschland Stand 2019 vs. Soll 2030 mit dem Vergleich der Gesetzesänderungen aus dem Energiesofortmaßnahmenpaket vom 06.04.2022 und der Bekanntmachung zum Ausbau der Elektrolysekapazitäten vom Juni 2022 (BMWK, 2022, a, b; Bundesregierung, 2022; pers. com. Acatech, 2022; DESTATIS, 2022a; KSG, 2021; Bundesregierung, 2020; Bundesregierung, 2019; EEG, 2021; Bundesregierung, 2020a; Bundesregierung, 2022). \*Stand Oktober 2022.

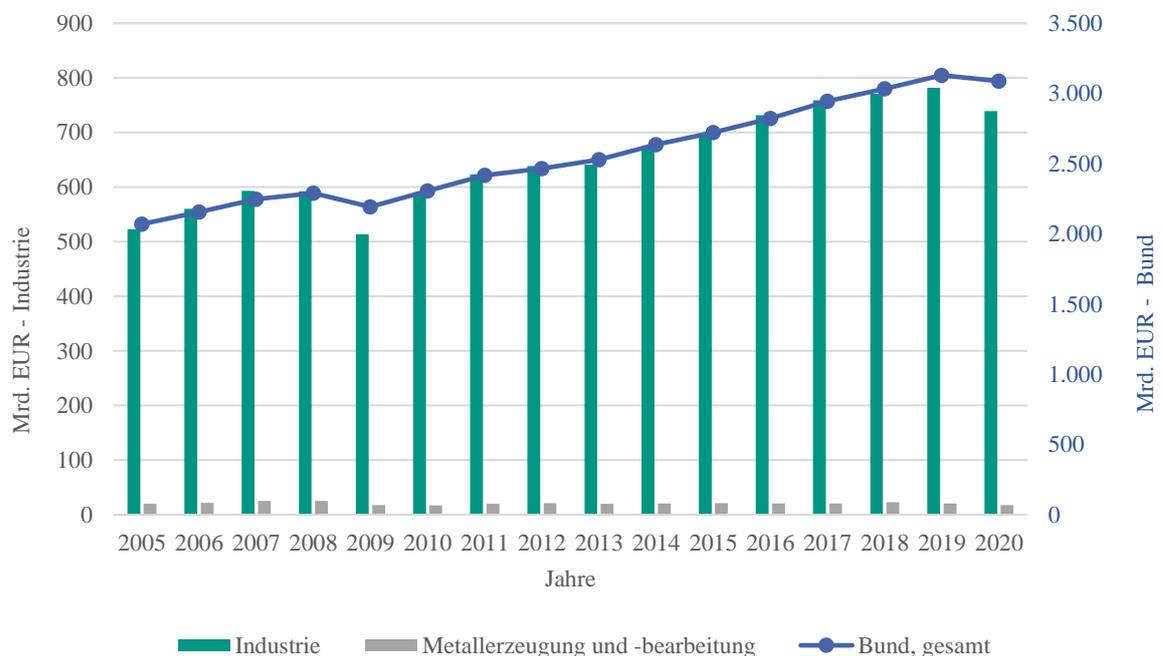
Kriterium		Stand 2019	Ziel 2030	Aktualisierung für 2030
Reduktion der THG-Emissionen i. V. z. 1990		- 37,9 %	- 65 %	k. A.
Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch		17,7 %	30 %	k. A.
Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch		41,8 %	65 %	80 %
Ausbau der installierten Wind- und Solarkraft	Windkraft Land	53,2 GW	71 GW	115 GW
	Windkraft See	7,6 GW	20 GW	30 GW
	Photovoltaik	48,9 GW	100 GW	215 GW
Elektrolysekapazität für Wasserstoff		0,17 MW*	5 GW	10 GW
Anteil der Industrie an der Bruttowertschöpfung		24,98 % (~ 770 Mrd. EUR)	25 %	k. A.

<sup>30</sup> Der Begriff „Industrie“ umfasst die Wirtschaftszweige „Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden“, „Verarbeitendes Gewerbe“, „Energieversorgung“ sowie „Wasserversorgung; Abwasser- und Abfallentsorgung und Beseitigung von Umweltverschmutzungen“ (Eurostat, 2016; Destatis WZ-Erläuterungen 2008).

## 7.18 Dekarbonisierung der Stahlproduktion in Deutschland

Deutschland war mit 42,4 Mio. t Rohstahlproduktion im Jahr 2018 der siebtgrößte Stahlproduzent der Welt, der Anteil an der Weltproduktion betrug 2,3 % (WorldSteelAssociation, 2020; WV Stahl, 2021). Im Jahr 2019 wurden in Deutschland 39,6 Mio. t Rohstahl hergestellt, davon ca. 27,7 Mio. t (ca. 70 %) über die Primärroute in den acht integrierten Hüttenwerken mit Hochofen, wo die meisten Emissionen anfallen (WV Stahl, 2020). Unter dem Einfluss verschiedener globaler wirtschaftlicher Faktoren und der COVID-19-Pandemie wurden 2020 in Deutschland 0,9 Mio. t weniger Rohstahl produziert als im Jahr zuvor, der Anteil des über die Primärroute produzierten Rohstahls sank auf 68 % (Puls, 2021; WV Stahl, 2021).

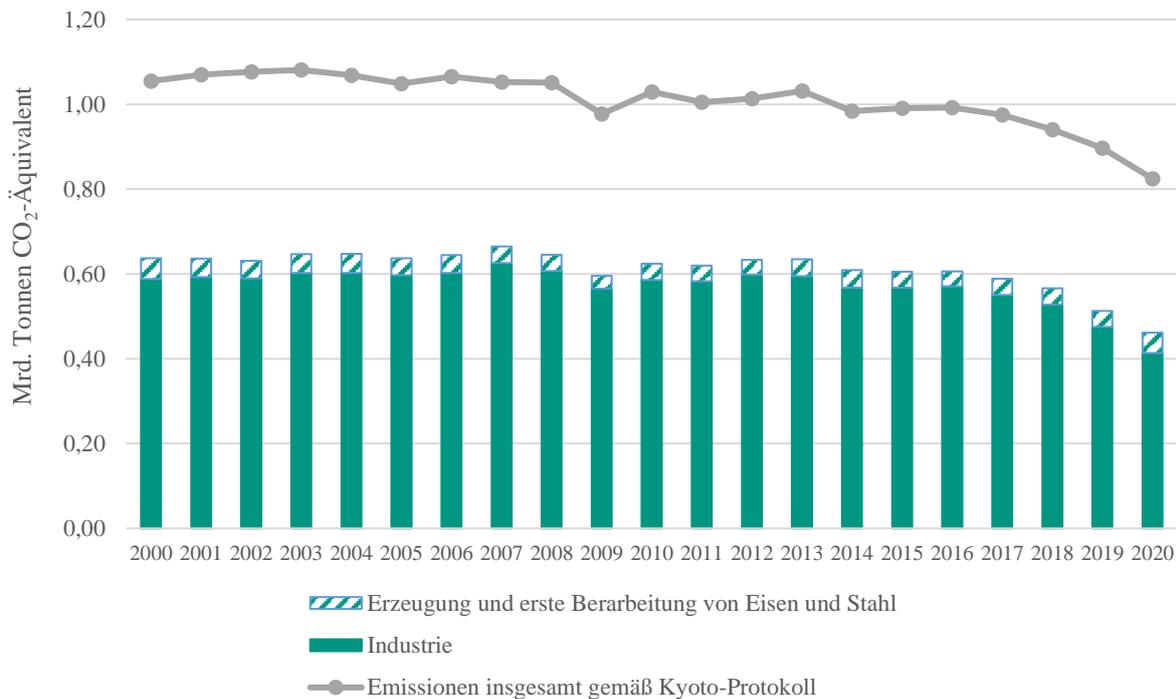
Im Jahr 2019 hat der Wirtschaftszweig „Metallerzeugung und -bearbeitung“ 0,67 % zur Bruttowertschöpfung beigetragen (i. V. im Jahr 2008: 1,10 %; Abb. 7.3; DESTATIS, 2022a, b, c). Mehrere Studien weisen darauf hin, dass vor allem die Stahlproduktion einen hohen Produktionsmultiplikator besitzt (Döhrn und Janßen-Timmen, 2012; Limbers et al., 2016). Sie liefert für diverse nachgelagerte Industrien wie beispielsweise für den Maschinenbau ca. 21 % und die Automobilbranche ca. 13 % essenzielle Vorleistungen<sup>31</sup> (Limbers et al., 2016). Durch die Produktion und Verarbeitung von Stahl sind in Deutschland indirekt 3,7 Millionen Menschen beschäftigt (Küster-Simic et al., 2020). Laut Wirtschaftsvereinigung Stahl (2020) sind bis zu vier Millionen Arbeitsplätze in Deutschland mit Stahl in Verbindung zu bringen, was im Jahr 2019 ca. 9 % der Erwerbstätigen wäre (DESTATIS, 2022d).



**Abbildung 7.3:** Bruttowertschöpfung in Deutschland in den Jahren 2005 bis 2020 in der Industrie, der Metallerzeugung und -bearbeitung, sowie die gesamte deutsche Bruttowertschöpfung (nach Destatis, 2022a, b, c).

<sup>31</sup> „Vorleistungen: im Rahmen der Entstehungsrechnung des Sozialprodukts bzw. Inlandsprodukts der Wert der bezogenen Produktionsgüter wie Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, Fertigteile, Halbfabrikate, Handelswaren oder Dienstleistungen, die Unternehmen von anderen Unternehmen kaufen und in der eigenen Produktion verwenden.“ (bpb, 2023).

Die Industrie Deutschlands war zu 57 % (ca. 512 Mio. t CO<sub>2</sub>äquiv.) am gesamten THG-Ausstoß (ca. 897 Mio. t CO<sub>2</sub>äquiv. gemäß Kyoto-Protokoll-Berechnung) im Jahr 2019 in Deutschland beteiligt (DESTATIS, 2021). Betrachtet man die Untersektoren der Industrie, so ist der größte Emittent die Energieversorgung mit ca. 307 Mio. t CO<sub>2</sub>äquiv., danach folgt das Verarbeitende Gewerbe mit ca. 182 Mio. t CO<sub>2</sub>äquiv., der größte Emittent des Verarbeitenden Gewerbes ist die Metallherzeugung und -bearbeitung mit ca. 42 Mio. t CO<sub>2</sub>äquiv., wobei die Erzeugung und erste Bearbeitung von Eisen und Stahl mit ca. 37 Mio. t CO<sub>2</sub>äquiv. ausmachte, was ca. 4 % der gesamten THG-Emissionen in Deutschland entspricht (Abb. 7.4; DESTATIS, 2021).



**Abbildung 7.4:** THG-Emissionen gesamt und anteilig für die Industrie zwischen den Jahren 2000 bis 2020 in Deutschland (nach DESTATIS, 2022e).

Eine Möglichkeit, bei der Stahlproduktion in Deutschland die Emissionen zu vermindern, stellt die Umrüstung der Primärproduktion mit Kokerei, Sinteranlage und Hochofen und Konverter oder Vorreduktion und Konverter hin zu einer Direktreduktion von Eisenerz mithilfe von Wasserstoff als Reduktionsmittel in einem Schachtofen und Elektro-Lichtbogenofen zur Stahlerzeugung dar (Yilmaz, 2018). Diese Technologie wird industriell getestet, das Technologiereife-Level (TRL) liegt zwischen 7 und 8 (Draxler et al., 2021). Die „Wasserstoffbasierte Suspensionsreduktion“ und die „Wasserstoff-Plasma-Schmelzreduktion“ befinden sich beide noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase (Bäck et al., 2015; Weigel, 2014; Ito et al., 2020). Neben dem stofflichen Einsatz kann Wasserstoff auch energetisch Verwendung im Stahlerzeugungs- und Weiterverarbeitungsprozess finden. Wo bisher als Nebenprodukte Prozesswärme oder Kuppelgase eingesetzt worden sind, bedarf es energetische Alternativen (Albrecht et al., 2022). Im Allgemeinen geht das Wirtschaftsministerium (BMWK) davon aus, dass für eine Jahresproduktion von ca. 30 Mio. t Rohstahl insgesamt ca. 2 Mio. t Wasserstoff im Jahr in Deutschland benötigt werden (Bundesregierung, 2021).

## 7.19 Wasserstoffproduktion und Elektrolyseurtechnologien

Wasserstoff ist das leichteste Element und kommt in der Erdkruste vor (Franke et al., 2020). Die gravimetrische Energiedichte (bei Normalbedingungen 0 °C, 1,013 bar, gasförmig) von Wasserstoff ist mit ca. 119,83 MJ/kg im Vergleich zu anderen Energieträgern hoch, die von Methan liegt bei 50 MJ/kg, die von flüssigen Kohlenwasserstoffen bei ca. 43 MJ/kg (Klell et al., 2018; Schüth, 1984). Die volumetrische Energiedichte (bei Normalbedingungen 0 °C, 1,013 bar, gasförmig von Wasserstoff) ist mit ca. 10,8 MJ/Nm<sup>3</sup> gering, was den Transport von Wasserstoff in Gasform ineffizienter macht i. V. z. anderen Energieformen wie Methan, was eine volumetrische Energiedichte von 35,9 MJ/Nm<sup>3</sup> aufweist (Klell et al., 2018; Schmidt, 2020).

Aus Kohlenwasserstoffen kann sogenannter „grauer“<sup>32</sup> Wasserstoff produziert werden. Der in Deutschland hergestellte Wasserstoff ist derzeit zu 95 % grau (48 % aus Erdgas, 30 % aus Erdöl, 18 % aus Kohle und 4 % aus Elektrolyse, Schmidt, 2020). Bei der industriell etablierten Methode der Dampfreformierung wird aus 700 bis 900 °C heißem Wasserdampf und Erdgas bei 20 bis 40 bar zunächst Wasserstoff als Bestandteil eines Synthesegases (bestehend aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff) gebildet (Klell et al., 2018). In der genannten „Wassergasreaktion“ wird unter Zugabe von weiterem Wasserdampf aus Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasser (H<sub>2</sub>O), Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>) erzeugt (Klell et al., 2018).

Wird das CO<sub>2</sub> abgeschieden und im Untergrund dauerhaft gespeichert (CCS<sup>33</sup>), wird das Treibhausgas bei der Emissionsberechnung ausbalanciert und die Methode wird als klimafreundlich eingestuft. Dieser aus Kohlenwasserstoffen gebildete Wasserstoff wird als „blau“ bezeichnet (Bundesregierung, 2020a). Damit der produzierte Wasserstoff als „grün“ bezeichnet werden kann, muss die Erzeugung durch die Wasserelektrolyse erfolgen, die durch Strom aus erneuerbaren Energien ermöglicht wird (Bundesregierung, 2020a, 2021; § 3 Nr. 21, 27a EEG). Die Produktion durch Elektrolyseure liefert Wasserstoff in einer hohen Qualität (99,9 % Reinheit) (Terlouw et al., 2022). In der Literatur werden drei Elektrolyseurtechnologien diskutiert, die im Jahr 2030 hauptsächlich zum Einsatz kommen werden. Seit jüngster Zeit ist noch eine vierte Technologie für die industrielle Anwendung auf den Markt gekommen. Im Folgenden werden alle vier Elektrolyseurtechnologien kurz beschrieben.

---

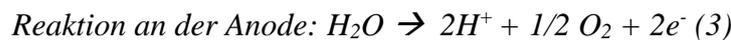
<sup>32</sup> Die Farbenlehre der Wasserstoffproduktionsweisen geht je nach Institution oder Autor auseinander, so zählt Schmidt (2020) die Herstellung von Wasserstoff aus der Methanpyrolyse zum „blauen“ Wasserstoff, wobei beispielsweise die Bundesregierung (2021a) diesen als „türkis“ einordnet. In der Kurzstudie „Wasserstoff – Farbenlehre“ von Hornig & Kalis (2020) werden die Farben noch weiter unterteilt, so wird Wasserstoff hergestellt aus Steinkohle als „schwarz“ und aus Braunkohle als „braun“ bezeichnet. Wasserstoff aus Kernenergie wird dort als „rot“ bezeichnet, die EnBW beispielsweise bezeichnet diesen als „gelb“ (EnBW, 2022).

<sup>33</sup> CCS: Carbon Capture and Storage = CO<sub>2</sub>-Abscheidungs- und -speicherungsverfahren.

Die alkalische Wasserelektrolyse (AEL) ist die Technologie, die seit Jahrzehnten im industriellen Maßstab eingesetzt wird (Bhandari et al., 2014; DERA, 2022). Die Betriebstemperatur liegt bei ca. 85 °C, der Betriebsdruck bei ca. 33 bar (Koj et al., 2015). Die Elektroden sind in eine Elektrolytlösung, zumeist 25–30 % Kalilauge, eingetaucht (David et al., 2019). Diese erhöht die Leitfähigkeit der Hydroxidionen, die von der Kathode durch eine nichtleitende Membran, dem Diaphragma, zur Anode diffundieren, wo Sauerstoff durch Abgabe der elektrischen Ladung entsteht (Carmo et al., 2019; Gl. 1 und 2).



Auch die Wasserstoffproduktion mittels eines Elektrolyseurs mit protonendurchlässigen Feststoff-Polymer-Membranen (Engl. Proton-Exchange Membran, PEM) findet immer mehr industrielle Anwendung (Smolinka et al., 2018). Wasser wird auf der Seite der Anode eingespeist, von dort diffundieren die positiv geladenen Wasserstoffatome (Protonen) durch die Polymerelektrolytmembran zur Kathode, wo sie zu Wasserstoff reduziert werden (David et al., 2019; Gl. 3 und 4).

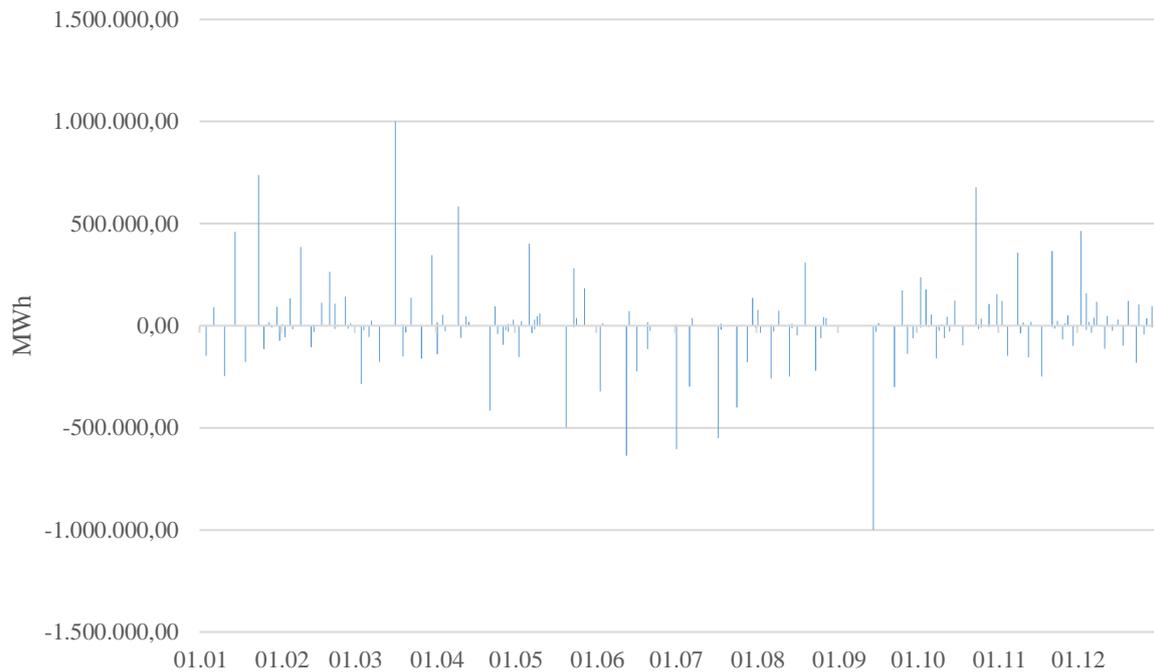


Der mittlerweile auch industriell zum Einsatz kommende Festoxid-Elektrolyse (SOEL – Solid Oxide Electrolysis), die bei höheren Temperaturen abläuft als die zuvor beschriebenen Methoden und die daher auch Hochtemperatur-Elektrolyse genannt wird, liegt die Technologie einer Feststoffbrennzelle (Engl. Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) zugrunde (David et al., 2019; Schmidt, 2020). Hier wird über die Kathode überhitzter Wasserdampf zugeführt, welcher mit zwei Elektronen zu Wasserstoff und Sauerstoffionen reagiert. Die Sauerstoffionen diffundieren durch die leitenden keramischen Festelektrolyte zur Anode (Schmidt, 2020; Gl. 5 und 6).

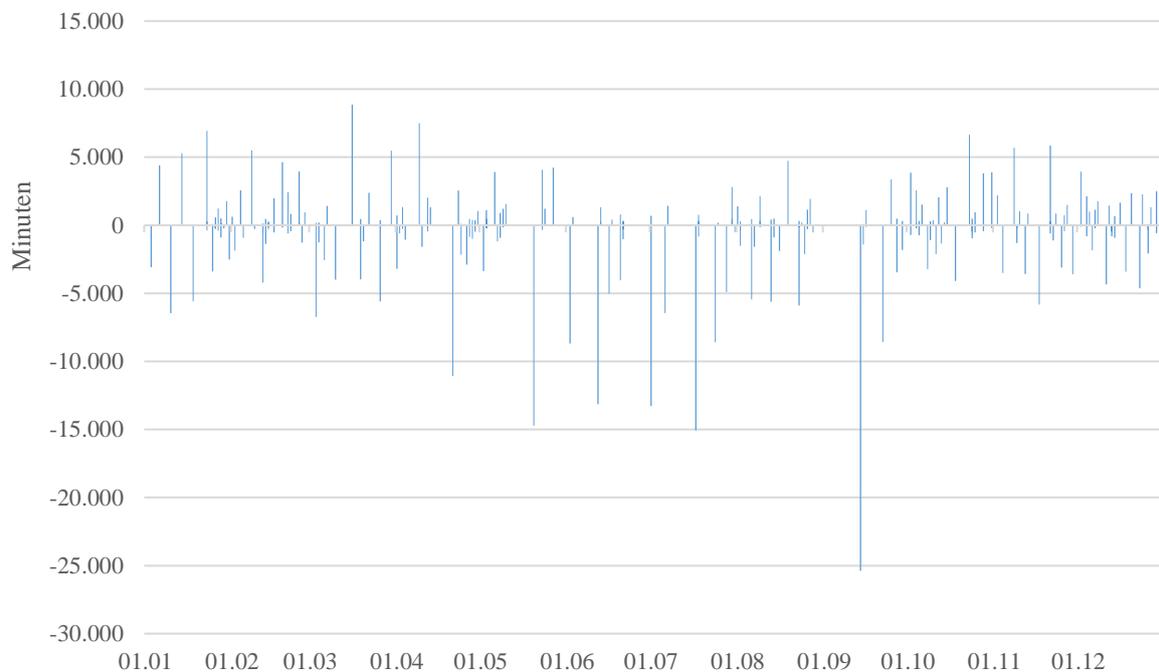


Die jüngste im industriellen Maßstab auf dem Markt verfügbare Elektrolyseurtechnologie ist die Anionen-Austausch-Membran-Elektrolyse (Engl. Anion Exchange Membran Electrolysis, AEMEL). Sie verbindet die AEL- und PEMEL-Technologie, indem sie aufgebaut ist wie ein PEMEL, die Reaktion allerdings abläuft wie bei einer AEL (David et al., 2019).

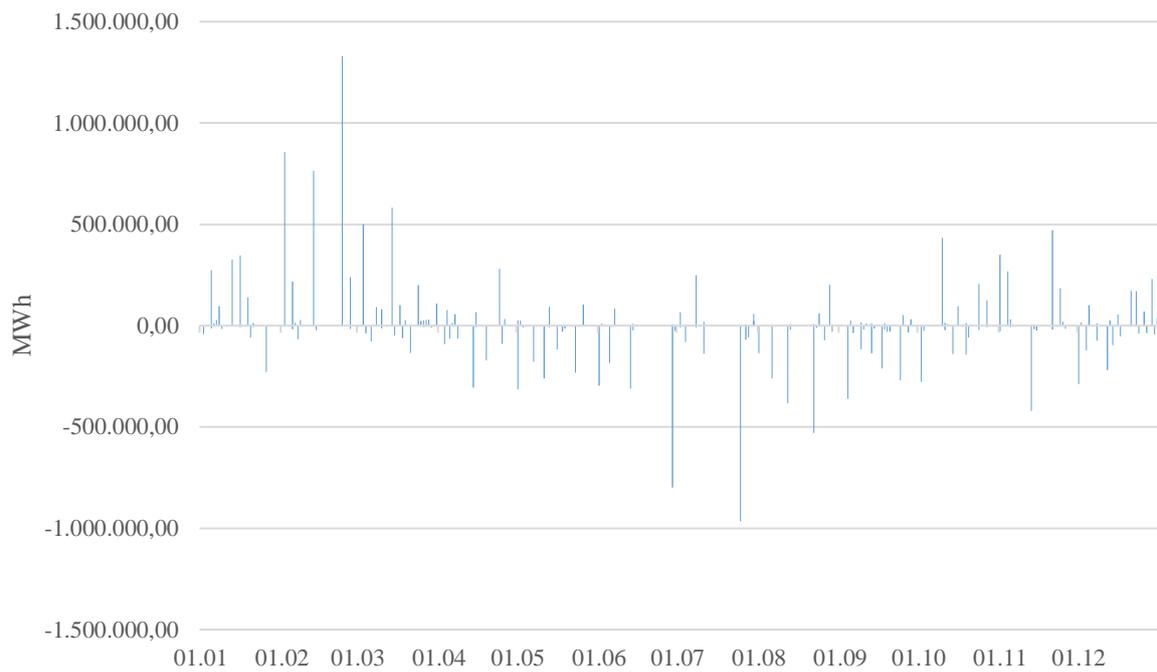
## 7.20 Defizit- und Überschusserzeugung



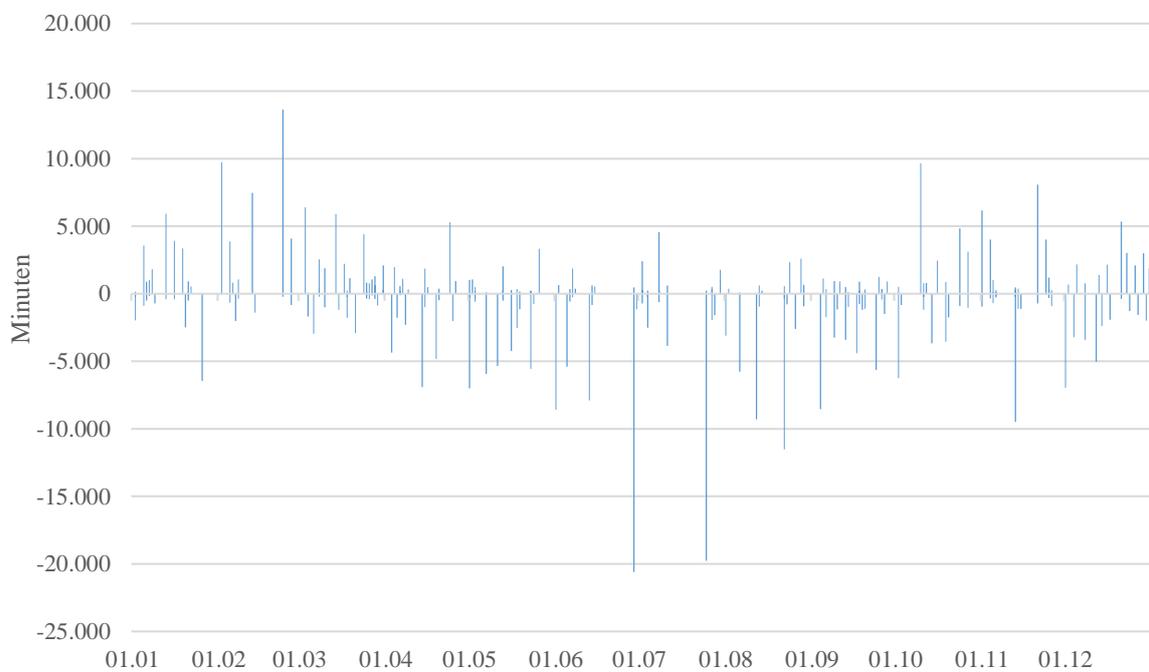
**Abbildung 7.5:** Defizit- und Überschusserzeugung (MWh) im Jahr 2030 durch das modellierte Bezugsjahr 2021. 0 stellt die benötigte Energie für die Elektrolyseure je Viertelstunde dar (1.041 MWh).



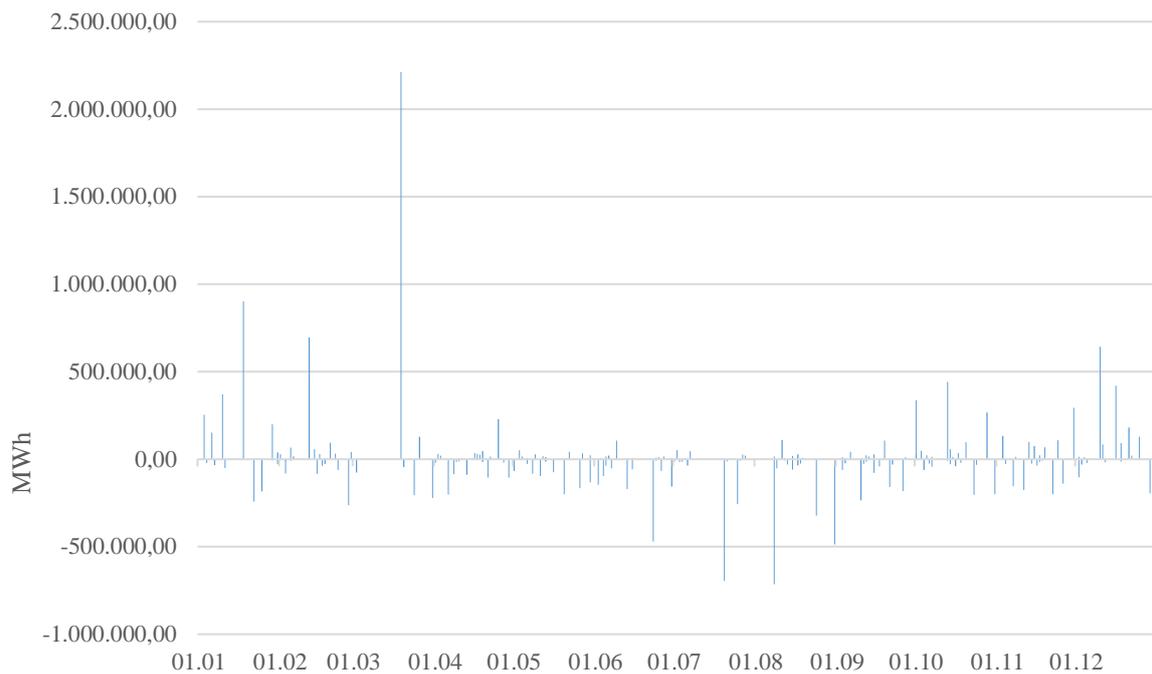
**Abbildung 7.6:** Defizit- und Überschussperioden (Minuten) im Jahr 2030 durch das modellierte Bezugsjahr 2021. 0 stellt den Zeitpunkt dar, an dem die Periode, gemessen an der benötigten Energieerzeugung für die Elektrolyseure (1.041 MWh), von Defizit zu Überschuss oder andersherum gewechselt hat.



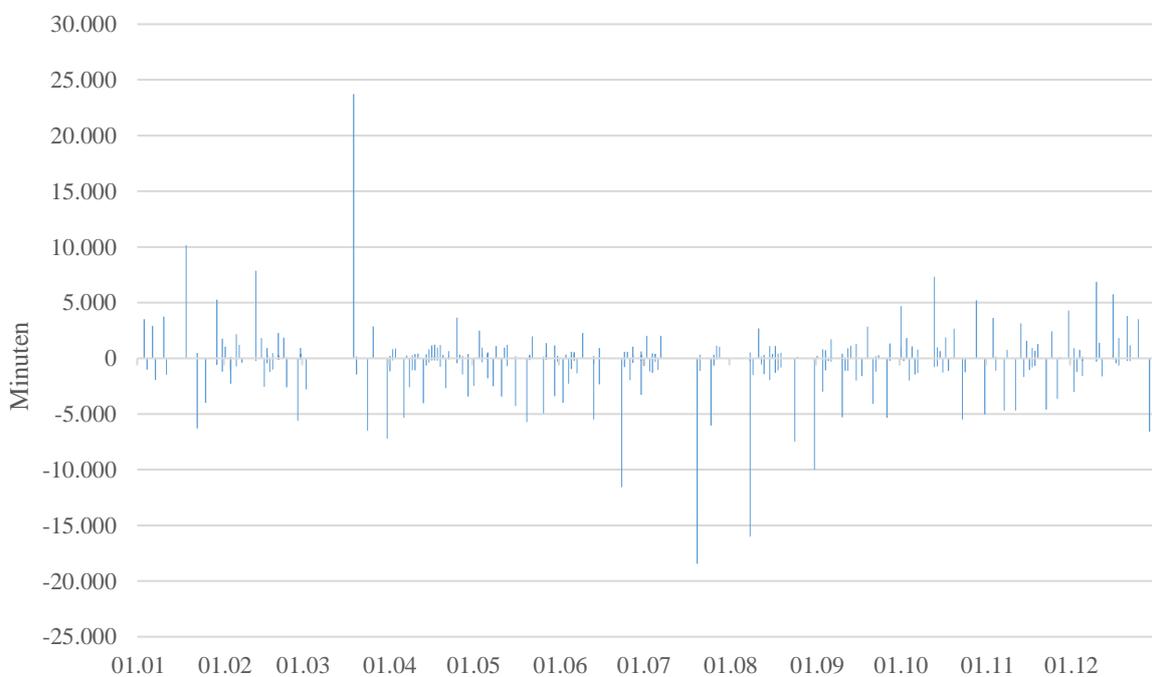
**Abbildung 7.7:** Defizit- und Überschusserzeugung (MWh) im Jahr 2030 durch das modellierte Bezugsjahr 2020. 0 stellt die benötigte Energie für die Elektrolyseure je Viertelstunde dar (1.041 MWh).



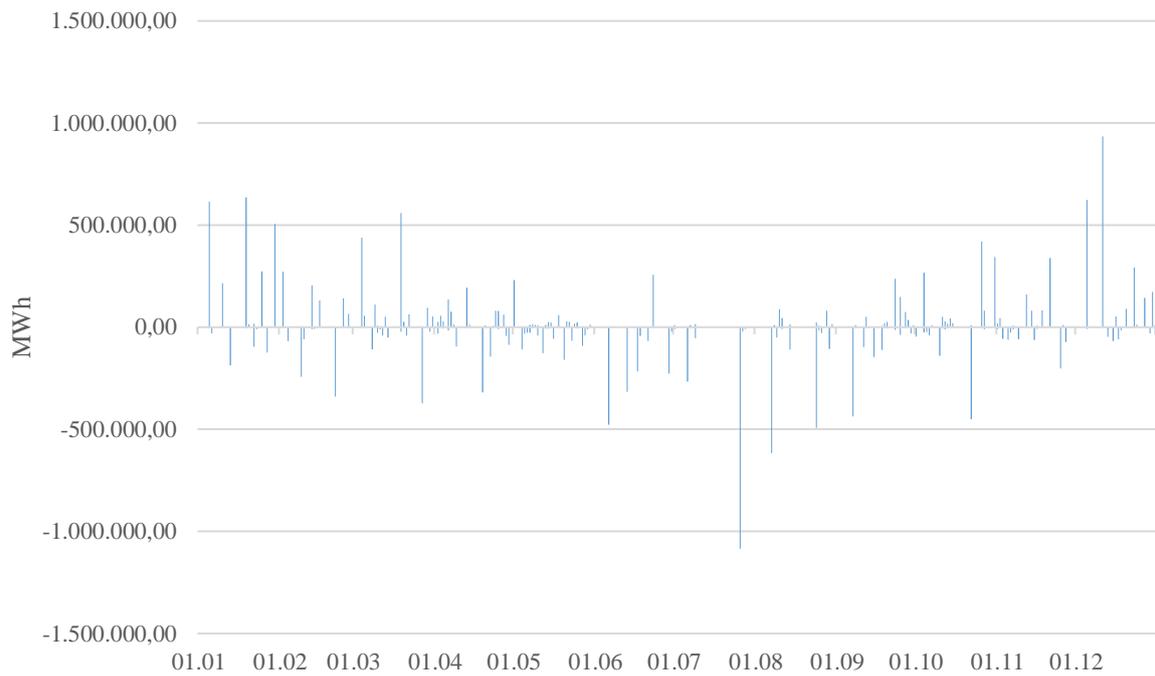
**Abbildung 7.8:** Defizit- und Überschussperioden (Minuten) im Jahr 2030 durch das modellierte Bezugsjahr 2020. 0 stellt den Zeitpunkt dar, an dem die Periode, gemessen an der benötigten Energieerzeugung für die Elektrolyseure (1.041 MWh), von Defizit zu Überschuss oder andersherum gewechselt hat.



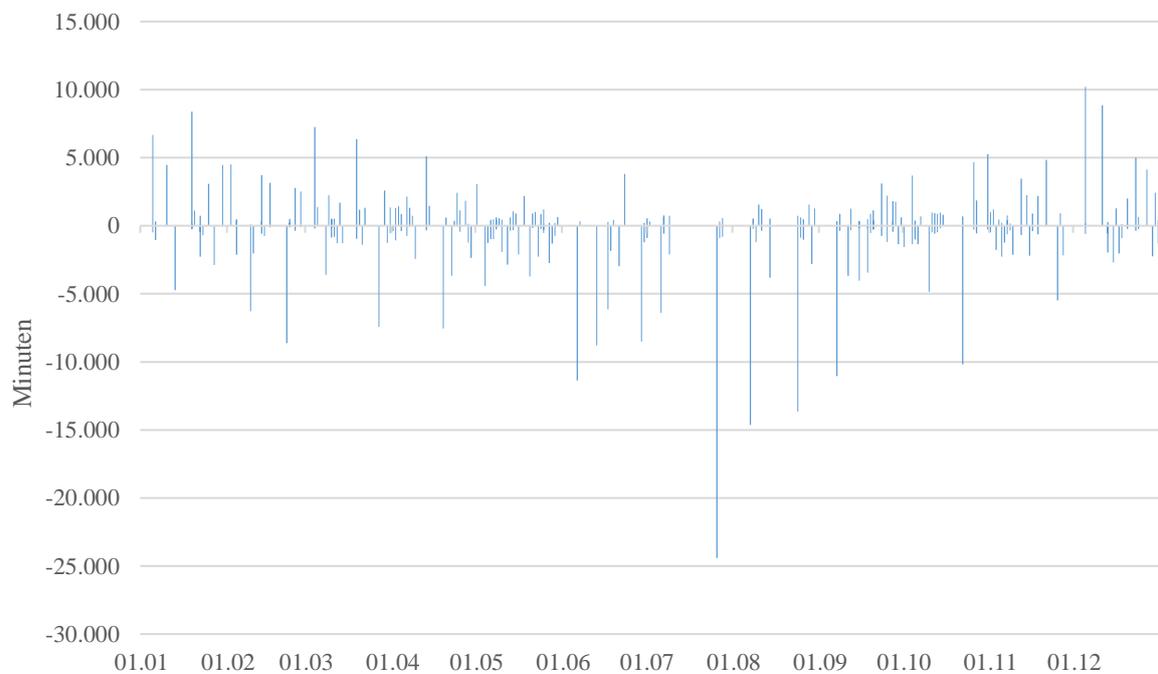
**Abbildung 7.9:** Defizit- und Überschusserzeugung (MWh) im Jahr 2030 durch das modellierte Bezugsjahr 2019. 0 stellt die benötigte Energie für die Elektrolyseure je Viertelstunde dar (1.041 MWh).



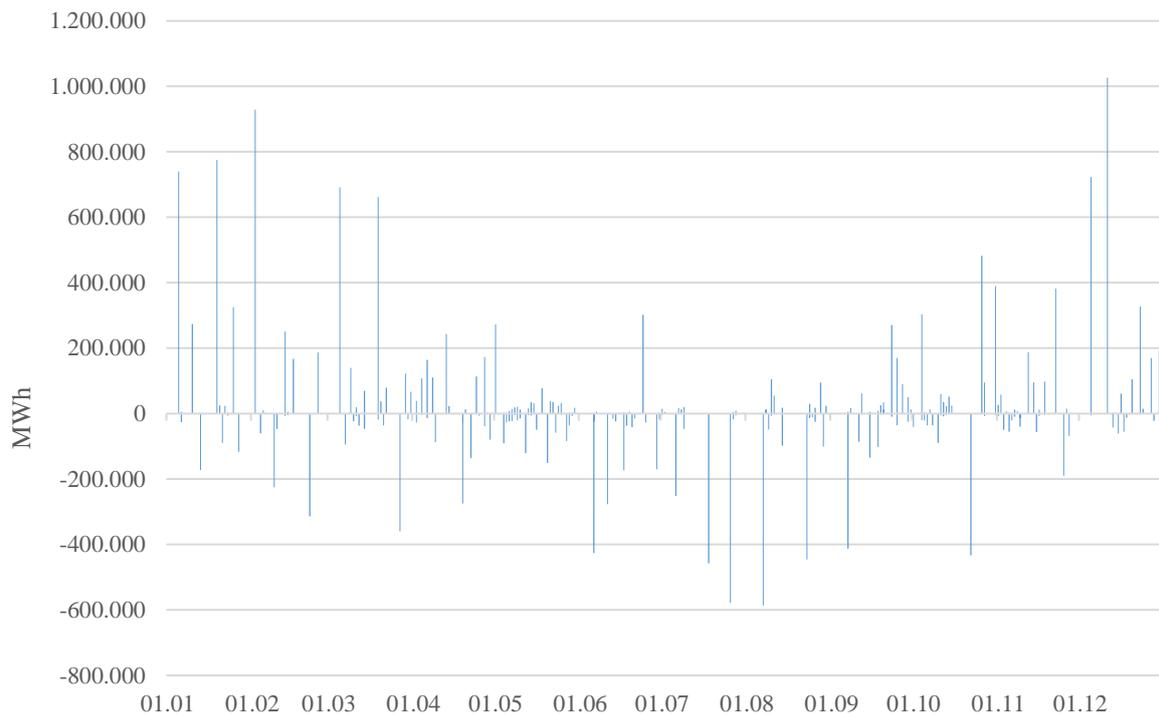
**Abbildung 7.10:** Defizit- und Überschussperioden (Minuten) im Jahr 2030 durch das modellierte Bezugsjahr 2019. 0 stellt den Zeitpunkt dar, an dem die Periode, gemessen an der benötigten Energieerzeugung für die Elektrolyseure (1.041 MWh), von Defizit zu Überschuss oder andersherum gewechselt hat.



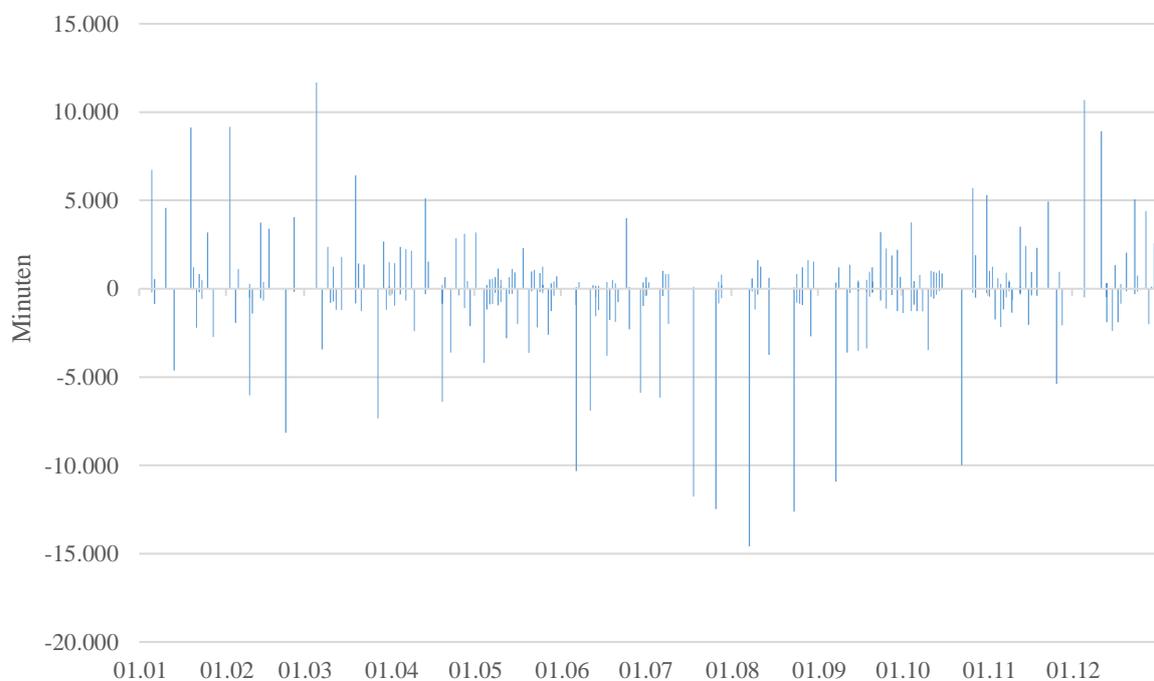
**Abbildung 7.11:** Defizit- und Überschusserzeugung (MWh) im Jahr 2030 durch das modellierte Bezugsjahr 2018. 0 stellt die benötigte Energie für die Elektrolyseure je Viertelstunde dar (1.041 MWh).



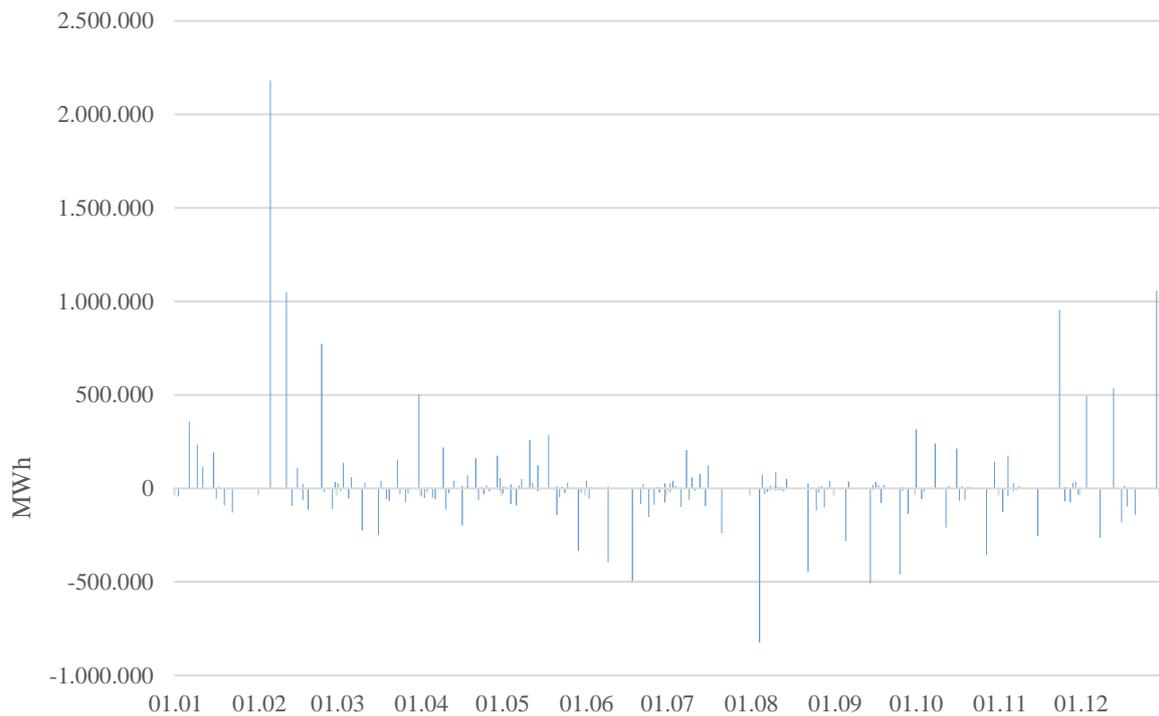
**Abbildung 7.12:** Defizit- und Überschussperioden (Minuten) im Jahr 2030 durch das modellierte Bezugsjahr 2018. 0 stellt den Zeitpunkt dar, an dem die Periode, gemessen an der benötigten Energieerzeugung für die Elektrolyseure (1.041 MWh), von Defizit zu Überschuss oder andersherum gewechselt hat.



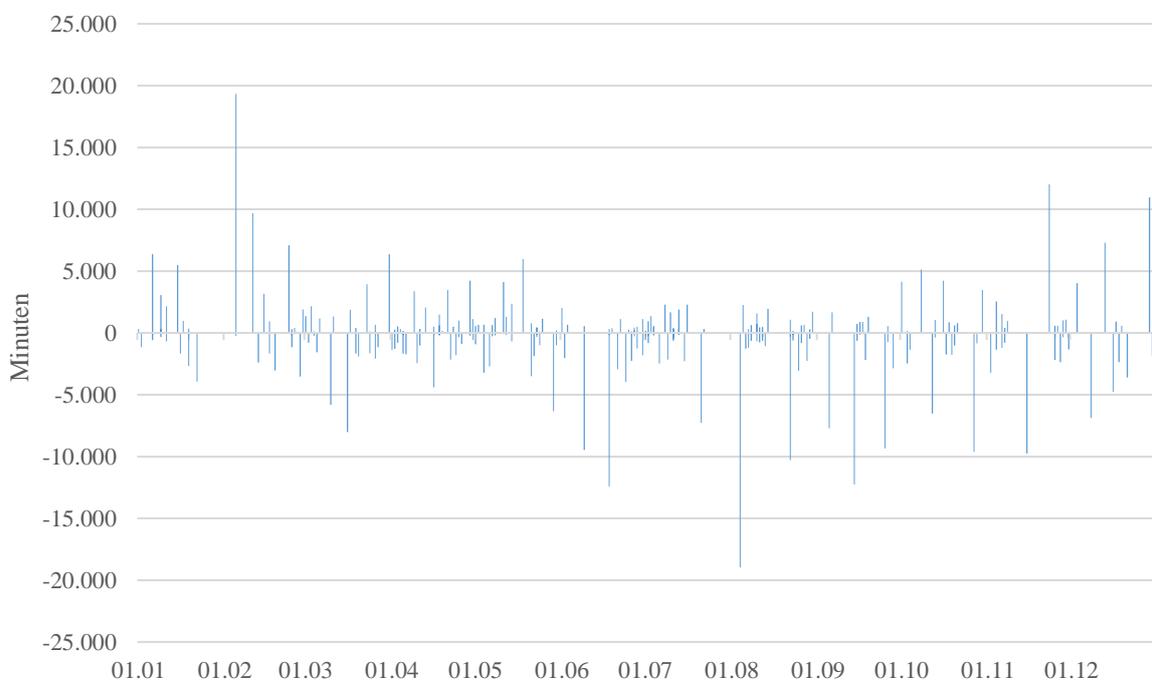
**Abbildung 7.13:** Defizit- und Überschusserzeugung (MWh) im Jahr 2030 durch das modellierte Bezugsjahr 2017. 0 stellt die benötigte Energie für die Elektrolyseure je Viertelstunde dar (1.041 MWh).



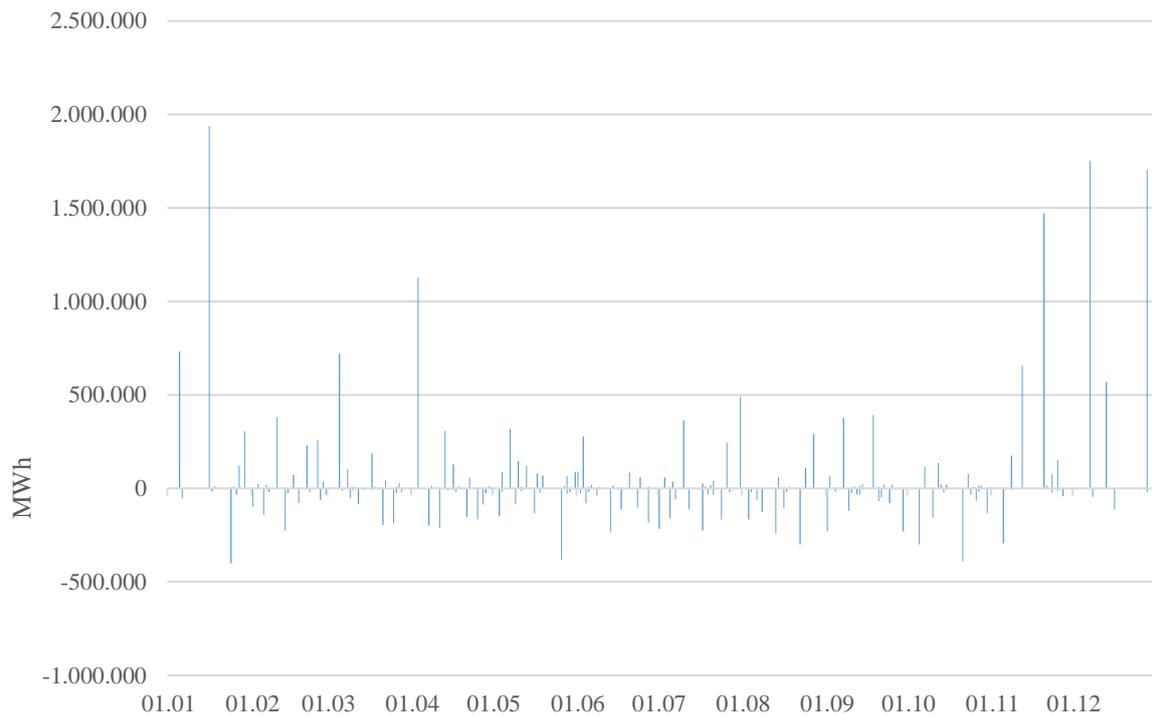
**Abbildung 7.14:** Defizit- und Überschussperioden (Minuten) im Jahr 2030 durch das modellierte Bezugsjahr 2017. 0 stellt den Zeitpunkt dar, an dem die Periode, gemessen an der benötigten Energieerzeugung für die Elektrolyseure (1.041 MWh), von Defizit zu Überschuss oder andersherum gewechselt hat.



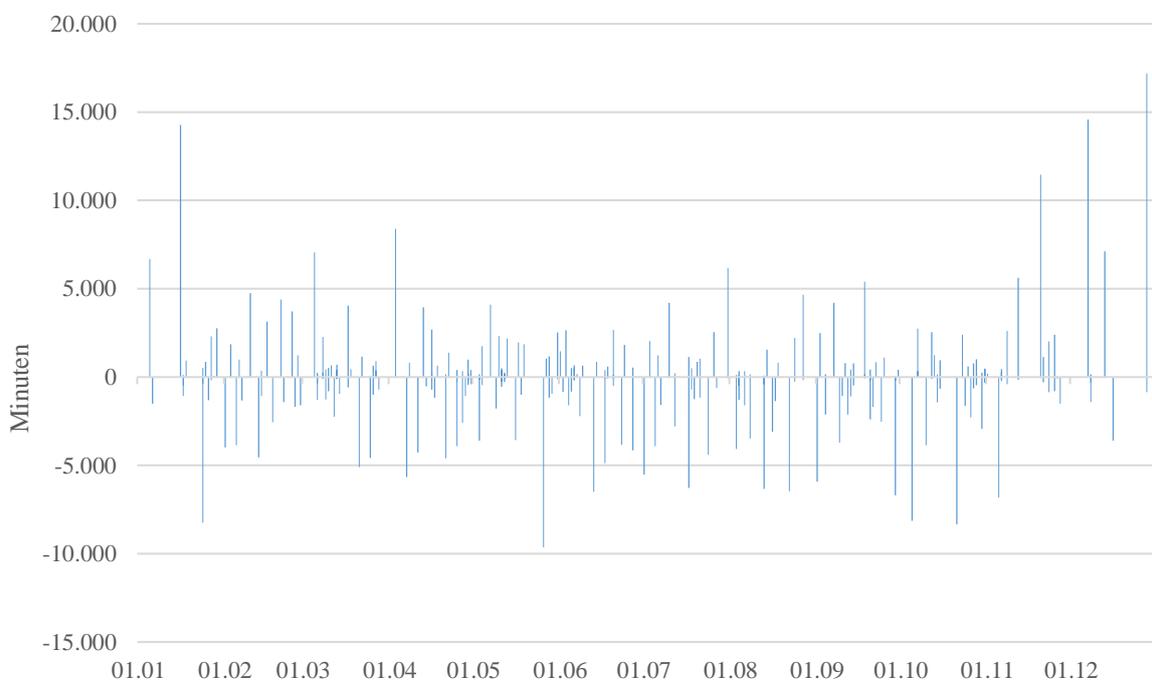
**Abbildung 7.15:** Defizit- und Überschusserzeugung (MWh) im Jahr 2030 durch das modellierte Bezugsjahr 2016. 0 stellt die benötigte Energie für die Elektrolyseure je Viertelstunde dar (1.041 MWh).



**Abbildung 7.16:** Defizit- und Überschussperioden (Minuten) im Jahr 2030 durch das modellierte Bezugsjahr 2016. 0 stellt den Zeitpunkt dar, an dem die Periode, gemessen an der benötigten Energieerzeugung für die Elektrolyseure (1.041 MWh), von Defizit zu Überschuss oder andersherum gewechselt hat.



**Abbildung 7.17:** Defizit- und Überschusserzeugung (MWh) im Jahr 2030 durch das modellierte Bezugsjahr 2015. 0 stellt die benötigte Energie für die Elektrolyseure je Viertelstunde dar (1.041 MWh).



**Abbildung 7.18:** Defizit- und Überschussperioden (Minuten) im Jahr 2030 durch das modellierte Bezugsjahr 2015. 0 stellt den Zeitpunkt dar, an dem die Periode, gemessen an der benötigten Energieerzeugung für die Elektrolyseure (1.041 MWh), von Defizit zu Überschuss oder andersherum gewechselt hat.

## 8. Literaturverzeichnis

- Abdelbaky, M., Peeters, J.R., Duflou, J.R., Dewulf, W. (2020). Forecasting the EU recycling potential for batteries from electric vehicles. *Procedia CIRP*, 90, S. 432–436. doi: 10.1016/j.procir.2020.01.109.
- Abel-Koch, J. (2021). Lieferengpässe in der Breite des Mittelstands deutlich spürbar. *KfW Research*, 351. Abgerufen am 04. Januar 2022 von <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzerntemen/Research/PDF-Dokumente-Fokus-Volkswirtschaft/Fokus-2021/Fokus-Nr.-351-Oktober-2021-Lieferengpaesse.pdf>.
- Aberle, A. (2006). Fabrication and characterisation of crystalline silicon thin-film materials for solar cells. *Thin Solid Films* (511 - 512), S. 26 - 34. doi:10.1016/j.tsf.2005.12.070.
- acatech (Löffler, M.). (2021). E-Mail-Korrespondenz vom 17. Oktober 2022. *Frage zur aktuellen Elektrolyseurkapazität in Deutschland*.
- acatech. (2017). *Rohstoffe für die Energiewende: Wege zu einer sicheren und nachhaltigen Versorgung (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung)*, 104 S. (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina & Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, Hrsg.) München: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. Abgerufen am 05. November 2021 von <https://www.acatech.de/publikation/rohstoffe-fuer-die-energiewende-wege-zu-einer-sicheren-und-nachhaltigen-versorgung/>.
- acatech. (2017a). »Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende. *Stellungnahme November 2017*, 100 S. (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, & Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, Hrsg.) München: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. Abgerufen am 31. Januar 2022 von [https://www.leopoldina.org/uploads/tx\\_leopublication/2017\\_11\\_14\\_ESYS\\_Sektorkopplung.pdf](https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2017_11_14_ESYS_Sektorkopplung.pdf).
- acatech und DECHEMA (Hrsg.). (2022). *Rohstoffe für die Elektrolyseur-Produktion. Mögliche Engpässe aufgrund von Russlands Konfrontation mit dem Westen*, 15 S. Berlin: Wasserstoffkompass. Abgerufen am 14. Oktober 2022 von [https://www.wasserstoffkompass.de/fileadmin/user\\_upload/img/news-und-media/dokumente/2022-09\\_Rohstoffe\\_Elektrolyseurproduktion.pdf](https://www.wasserstoffkompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/2022-09_Rohstoffe_Elektrolyseurproduktion.pdf).
- acatech und DECHEMA (Hrsg.). (2022a). *Elektrolyse in Deutschland: Kapazitäten, Zielsetzungen und Bedarfe bis 2030*. Berlin: Wasserstoffkompass. Abgerufen am 14. Oktober 2022 von [https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user\\_upload/img/news-und-media/dokumente/Elektrolysekapazitaeten\\_.pdf](https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Elektrolysekapazitaeten_.pdf).
- ACISA – ACI Systems Alemania. (2021). *Bolivien und ACISA haben Gespräche wieder aufgenommen. Pressemitteilung vom 01. Februar 2021*. Abgerufen am 10. Januar 2022 von

- <https://www.acisa.de/de/aktuelles/news-detail-de/bolivien-und-acisa-haben-gespraechewieder-aufgenommen/>.
- AGEB – AG Energiebilanzen e. V. (2022). *Bilanz 2020*. Abgerufen am 17. Mai 2022 von <https://agenergiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2020/?wpv-jahresbereich-bilanz=2011-2020>.
- Albrecht, U., Ball, M., Bünger, U., Kutz, C. und Michalski, J. (2022). Metastudie zu den technischen, technologischen und wirtschaftlichen Parametern für die Umstellung der deutschen Stahlindustrie auf eine emissionsarme Stahlproduktion auf Basis von grünem Wasserstoff. *Emissionsfreie Stahlerzeugung*, 127 S. (L. B. Systemtechnik, Hrsg.) Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen Verband. Abgerufen am 10. Dezember 2022 von <https://lbt.de/publikationen/metastudie-emissionsfreie-stahlerzeugung/>.
- AMG Lithium. (2022). *Über uns*. Abgerufen am 15. August 2022 von <https://amglithium.com/de/unternehmen/ueber-uns>.
- Argus Media Group. (2022). *Prices & data – Lithium prices*. Abgerufen am 02. Mai 2022 von <https://www.argusmedia.com/metals-platform/metal/minor-and-specialty-metals-lithium>.
- Argus Media Group. (2022a). *Prices & data - Lithium prices*. Abgerufen am 12. August 2022 von <https://www.argusmedia.com/metals-platform/metal/minor-and-specialty-metals-lithium>.
- Argus Media Group. (2022b). *Prices & data - Lithium prices*. Abgerufen am 11. November 2022 von <https://www.argusmedia.com/metals-platform/metal/minor-and-specialty-metals-lithium>.
- Ariadne. (2021). Report. *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich*, 31 S. Potsdam: Kopernikus-Projekt Ariadne Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). doi:10.48485/pik.2021.006.
- Aschenbrand, E., Kühne, O. und Weber, F. (2017). *Rohstoffgewinnung in Deutschland: Auseinandersetzungen und Konflikte. Eine Analyse aus sozialkonstruktivistischer Perspektive*, 25, S. 3 - 4. uwf - Umweltwirtschaftsforum. doi:10.1007/s00550-017-0438-7.
- Bacanora Lithium. (05.06.2019). *Deutsche Lithium – Investor Relations*. Abgerufen am 03. November 2021 von Pressemitteilung: <http://www.deuschelithium.de/investor-relations/#nachrichten>.
- Bacanora Lithium. (2019). *Feasibility Study. Pressemitteilung vom 05. Juni 2019*. Abgerufen am 03. November 2021 von Deutsche Lithium - Investor Relations: <http://www.deuschelithium.de/investor-relations/#nachrichten>.
- Bäck, E., Schenk, J., Badr, K., Sormann, A. und Plaul, J. (2015). Wasserstoff als Reduktionsmittel für die Eisen- und Rohstahlerzeugung – Ist-Situation, Potentiale und Herausforderungen. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 160 (3), S. 96 - 102. doi:10.1007/s00501-015-0346-5.

- Bardt, H. (2008). Beiträge zur Ordnungspolitik aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln. *Sichere Energie- und Rohstoffversorgung. Herausforderung für Politik und Wirtschaft?*, 36, 45 S. IW-Positionen. Abgerufen am 06. September 2021 von [https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user\\_upload/Studien/IW-Analysen/PDF/Positionen/Positionen\\_36.pdf](https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/IW-Analysen/PDF/Positionen/Positionen_36.pdf).
- Bardt, H. und Hübner, C. (2018). *Vom Öl zum Lithium. Perspektiven neuer Rohstoffkooperationen*, 13 S. Konrad Adenauer Stiftung. Abgerufen am 28. Januar 2022 von [https://www.kas.de/documents/252038/253252/7\\_dokument\\_dok\\_pdf\\_51100\\_1.pdf/8e951094-d7ed-1769-cccf-016c831bf27a?version=1.0&t=1539648115827](https://www.kas.de/documents/252038/253252/7_dokument_dok_pdf_51100_1.pdf/8e951094-d7ed-1769-cccf-016c831bf27a?version=1.0&t=1539648115827).
- Bareiß, K., de la Rua, C., Möckl, M. und Hamacher, T. (2019). Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems. *Applied Energy*, S. 862 - 872. doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.001.
- Barros, R., Menuge, J. F. und Harrop, J. (2016). Spodumene pegmatites in southeast Ireland: petrogenesis and economic potential as a resource of lithium and rare metals. *Plinius*, 42, 1 S. Abgerufen am 08. Mai 2022 von [https://www.researchgate.net/publication/318466407\\_Spodumene\\_pegmatites\\_in\\_southeast\\_Ireland\\_petrogenesis\\_and\\_economic\\_potential\\_as\\_a\\_resource\\_of\\_lithium\\_and\\_rare\\_metals](https://www.researchgate.net/publication/318466407_Spodumene_pegmatites_in_southeast_Ireland_petrogenesis_and_economic_potential_as_a_resource_of_lithium_and_rare_metals).
- BASF. (2021). *BASF und Porsche entwickeln gemeinsam leistungsstarke Lithium-Ionen-Batterie für Elektrofahrzeuge. Pressemitteilung vom 21. Juli 2021*. Abgerufen am 16. September 2022 von <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2021/07/p-21-262.html>.
- Bäuerle, L., Behr, M. und Hütz-Adams, F. (2011). *Im Boden der Tatsachen. Metallische Rohstoffe und ihre Nebenwirkungen.*, 61 S. Südwind - Institut für Ökonomie und Ökumene. Abgerufen am 05. Juli 2021 von <https://www.suedwind-institut.de/files/Suedwind/Publikationen/2011/2011-14%20Im%20Boden%20der%20Tatsachen.%20Metallische%20Rohstoffe%20und%20ihre%20Nebenwirkungen.pdf>.
- Baum, Z., Bird, R., Yu, X. und Ma, J. (2022). Lithium-Ion Battery Recycling - Overview of Techniques and Trends. *ACS Energy Lett.*, 7(2), S. 712 - 719. doi:10.1021/acseenergylett.1c02602.
- BBergG. (2021). Bundes-Berggesetz (14. Juni 2021). Abgerufen am 03. November 2021 von <https://www.gesetze-im-internet.de/bbergg/BBergG.pdf>.
- BDEW. (2021). Fakten und Argumente. *Versorgungssicherheit Strom*, 24 S. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. Abgerufen am 28. November 2022 von <https://www.bdew.de/service/anwendungshilfen/fakten-und-argumente-versorgungssicherheit-strom/>.

- BDI. (2018). 6. *BDI-Rohstoffkongress. Programm 03. Juli 2018*, 2 S. Bundesverband Deutscher Industrie. Abgerufen am 04. Januar 2022 von [https://bdi.eu/media/user\\_upload/20180703\\_Programm\\_BDI\\_6.\\_Rohstoffkongress.pdf](https://bdi.eu/media/user_upload/20180703_Programm_BDI_6._Rohstoffkongress.pdf).
- BDI. (2018a). *Berliner Rohstoffklärung*, 2 S. Bundesverband Deutscher Industrie. Abgerufen am 05. September 2021 von <https://bdi.eu/artikel/news/bundesregierung-muss-rohstoffstrategie-ueberdenken/>.
- BDI. (2020). *Auswirkungen der COVID-19-Pandemie auf die Rohstoffversorgung. Ergebnisse der BDI-Umfrage vom 03. Juli 2020*, 25 S. Bundesverband Deutscher Industrie. Abgerufen am 04. Januar 2022 von [https://bdi.eu/media/themenfelder/rohstoffe/Umfrage\\_\\_BDI\\_\\_Auswirkungen\\_Covid19\\_auf\\_Rohstoffversorgung\\_\\_Juli\\_2020.pdf](https://bdi.eu/media/themenfelder/rohstoffe/Umfrage__BDI__Auswirkungen_Covid19_auf_Rohstoffversorgung__Juli_2020.pdf).
- BEE. (2021). *BEE fordert starken Beitrag von grünem Wasserstoff zum Erreichen der Klimaziele. Pressemitteilung vom 08. Juni 2021*. Bundesverband Erneuerbare Energie. Abgerufen am 02. Januar 2023 von <https://www.bee-ev.de/service/pressemitteilungen/beitrag/bee-fordert-starken-beitrag-von-gruenem-wasserstoff-zum-erreichen-der-klimaziele>.
- Bellini, M., Böskén, J., Wörle, M., Thöny, D., Gamboa-Carballo, J., Krumeich, F., Bàrtoli, F., Miller, H. A., Poggini, L., Oberhauser W., Lavacchi, A., Grützmacher, H., Vizza, F. (2022). Remarkable stability of a molecular ruthenium complex in PEM water electrolysis. *Chemical Science*, 13, S. 3748 - 3760. doi:10.1039/d1sc07234j
- Bergmann, A., Günther, E. und Kara, S. (2017). Resource Efficiency and an Integral Framework for Performance Management. *Sustainable Development*, 25, S. 150 - 165. doi:10.1002/sd.1669.
- Bernhart, W. (2019). *Zukunftsmarkt Batterie-Recycling: Verpasst Europa (wieder) den Anschluss?* Abgerufen am 03. März 2022 von [https://www.rolandberger.com/de/Insights/Publications/Zukunftsmarkt-Batterie-Recycling-Verpasst-Europa-\(wieder\)-den-Anschluss.html](https://www.rolandberger.com/de/Insights/Publications/Zukunftsmarkt-Batterie-Recycling-Verpasst-Europa-(wieder)-den-Anschluss.html).
- Bernt, M., Hartig-Weiß, A., Tovini, M. F., El-Sayed, H., Schramm, C., Schröter, J., Gebauer, C., Gasteiger, H. (2019). Current Challenges in Catalyst Development for PEM Water Electrolyzers. *Chemie Ingenieur Technik*, 92 (1-2), S. 31 - 39. doi:10.1002/cite.201900101.
- Bertram, I. (2021). tagesschau. *Neues Verfahren im Test: Batterie-Rohstoff aus Grubenwasser*. Abgerufen am 02. März 2022 von <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/Lithiumgewinnung-grubenwasser-nrw-101.html>.
- BEVG. (2020). *Die E&P Industrie in Zahlen. Statistischer Bericht 2020*, 32 S. Bundesverband Erdgas, Erdöl, Geoenergie e. V.
- BGE - Bundesanstalt für Endlagerung. (2017). Bericht über den Zeitraum 01. Januar – 31. Dezember 2015. *Chemische Analyse salinärer Lösungen aus dem Grubengebäude der Schachanlage*

- Asse II – Qualitätssicherung und Kontrollanalytik*, 319 S. Abgerufen am 14. März 2022 von [https://www.bge.de/fileadmin/user\\_upload/Asse/Wesentliche\\_Unterlagen/Strahlenschutz/UEberwachung\\_des\\_Wassers\\_in\\_der\\_Asse/20171116\\_Asse\\_Chemische\\_Analyse\\_Salinar\\_er\\_Loesungen\\_1Januar2015-31Dezember2015.pdf](https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Asse/Wesentliche_Unterlagen/Strahlenschutz/UEberwachung_des_Wassers_in_der_Asse/20171116_Asse_Chemische_Analyse_Salinar_er_Loesungen_1Januar2015-31Dezember2015.pdf).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2012). DERA informiert: *Grönlands Seltene Erden decken Weltbedarf für 150 Jahre. Pressemitteilung vom 02. Oktober 2012*. Hannover: BGR. Abgerufen am 12. März 2023 von [https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/DERA/dera-bgr-121002\\_groenland\\_seltene\\_erden.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/DERA/dera-bgr-121002_groenland_seltene_erden.html).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2016). *Quarzrohstoffe für Deutschland*, 72 S. Hannover. Abgerufen am 17. Januar 2022 von [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/studie\\_quarz\\_2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/studie_quarz_2016.pdf?__blob=publicationFile&v=6).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2020). *Deutschland - Rohstoffsituation 2019*. 150 S. Hannover. Abgerufen am 30. November 2020 von [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/rohsit-2019.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2019.html).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2020). *Lithium: Informationen zur Nachhaltigkeit*. 13 S. Hannover. Abgerufen am 10. Mai 2021 von [https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen\\_Nachhaltigkeit/lithium.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/lithium.pdf?__blob=publicationFile&v=4).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2020a). *Rohstoffwirtschaftlicher Steckbrief für Lithium*. 6 S. Hannover. Abgerufen am 17. Mai 2021 von [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief\\_li.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief_li.html).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2021). *Deutschland - Rohstoffsituation 2020*. 164 S. Hannover. Abgerufen am 17. Januar 2022 von [https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Nachrichten/Aktuelles/2020/2020-12-15\\_pm\\_bgr-bericht-rohstoffsituation-deutschland.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Nachrichten/Aktuelles/2020/2020-12-15_pm_bgr-bericht-rohstoffsituation-deutschland.html).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2021a). *Seltene Erden - Informationen zur Nachhaltigkeit*. Hannover. Abgerufen am 28. Dezember 2022 von [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Produkte/Informationen\\_zur\\_Nachhaltigkeit/seltene%20erden\\_verzeichnis.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/Informationen_zur_Nachhaltigkeit/seltene%20erden_verzeichnis.html).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2022). *Deutschland - Rohstoffsituation 2021*. 168 S. Hannover. Abgerufen am 10. Januar 2023 von [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Produkte/produkte\\_node.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/produkte_node.html).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. (2017). *Heimische mineralische Rohstoffe - unverzichtbar für Deutschland*, 84 S. Hannover. Abgerufen am 17. Januar 2022

von

[https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Downloads/studie\\_mineralische\\_rohstoffe\\_2017.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/studie_mineralische_rohstoffe_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=4).

- Bhandari, R., Trudewind, C. und Zapp, P. (2014). Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis - a review. *Journal of Cleaner Production*, 85, 151 - 163. doi:10.1016/j.jclepro.2013.07.048.
- BImSchG. (2020). Bundes-Immissionsschutzgesetz (3. Dezember 2020). *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge*. Abgerufen am 03. November 2021 von <https://www.gesetze-im-internet.de/bimSchG/BImSchG.pdf>.
- BMBF. (2022). *Wie das Leitprojekt H2Giga Elektrolyseure zur Wasserstoff-Herstellung in die Serienfertigung bringen will*. Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung. Abgerufen am 28. Dezember 2022 von <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/leitprojekte/h2giga>.
- BMW Group. (2021). *Für einen schnellen Ausbau der E-Mobilität: BMW Group erhöht nachhaltigen Bezug von Lithium für die Batteriezellfertigung*. Pressemitteilung vom 30. März 2021. Abgerufen am 02. Dezember 2021 von <https://www.press.bmwgroup.com/austria/article/detail/T0328716DE/fuer-einen-schnellen-ausbau-der-e-mobilitaet:-bmw-group-erhoeht-nachhaltigen-bezug-von-lithium-fuer-die-batteriezellfertigung>.
- BMW Group. (2021a). *Produktionsstart für Batteriemodule im BMW Group Werk Leipzig*. Pressemitteilung vom 30. April 2021. Abgerufen am 21. Juli 2022 von [https://www.bmwgroup-werke.com/leipzig/de/aktuelles/Start\\_Batteriemodulfertigung.html](https://www.bmwgroup-werke.com/leipzig/de/aktuelles/Start_Batteriemodulfertigung.html).
- BMWi (2019). Rohstoffstrategie der Bundesregierung, Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen. 40 S. Berlin. Abgerufen am 07. Dezember 2021 von [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=4).
- BMWi. (2010). Rohstoffstrategie der Bundesregierung. *Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen*, 27 S. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- BMWi. (2021). Publikation Rohstoffe und Ressourcen. *Rohstoffe: Bergbau, Recycling, Ressourceneffizienz – wichtig für Wohlstand und Arbeitsplätze*, 28 S. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Abgerufen am 03. September 2021 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffe-bergbau-recycling-ressourceneffizienz.html>.

- BMWi. (2021a). *IPCEIs in der Batteriezellfertigung (Mitteilung vom 11. März 2021)*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Abgerufen am 04. März 2022 von [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/I/ipceis-in-der-batteriezellfertigung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/I/ipceis-in-der-batteriezellfertigung.pdf?__blob=publicationFile&v=4) .
- BMWK. (2022). *Zahlen und Fakten: Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung. Letzte Aktualisierung vom 20. Januar 2022*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Abgerufen am 08. Juli 2022 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>.
- BMWK. (2022a). *Zeitreihen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Abgerufen am 16. Oktober 2022 von [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare\\_Energien\\_in\\_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html).
- BMWK. (2022b). *Überblickspapier Osterpaket vom 06. April 2022*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Abgerufen am 14. Oktober 2022 von [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406\\_ueberblickspapier\\_osterpaket.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=12](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406_ueberblickspapier_osterpaket.pdf?__blob=publicationFile&v=12).
- BMWK. (2022c). *Speichertechnologien*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Abgerufen am 11. Dezember 2022 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Energie/speichertechnologien.html> .
- BMWK. (2022d). *Elektromobilität. Batterien „made in Germany“ – ein Beitrag zu nachhaltigem Wachstum und klimafreundlicher Mobilität*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Abgerufen am 12. Mai 2022 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/batteriezellfertigung.html>.
- BMWK. (2022e). *FAQ Schlüsseltechnologien. Häufig gestellte Fragen zur EEG-Umlage bei „Grünem Wasserstoff“*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Abgerufen am 03. Januar 2023 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/FAQ/Gruener-Wasserstoff/faq-gruener-wasserstoff.html>.
- BMWK. (2022f). *Gasspeichergesetz. Versorgungssicherheit durch volle Gasspeicher*. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Abgerufen am 29. Mai 2022 von [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220325\\_faktenpapier\\_gasspeichergesetz.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220325_faktenpapier_gasspeichergesetz.pdf?__blob=publicationFile&v=8).
- BNEF - BloombergNEF. (2022). *China's Battery Supply Chain Tops BNEF Ranking for Third Consecutive Time, with Canada a Close Second. Blog Eintrag vom 12. November 2022*. Abgerufen am 13. November 2022 von <https://about.bnef.com/blog/chinas-battery-supply-chain-tops-bnef-ranking-for-third-consecutive-time-with-canada-a-close-second/>.

- Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F., & Pavel, C. (2020). Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU – A Foresight Study. European Commission. 100 S. Luxemburg: Publications Office of the European Union. Abgerufen am 10. Dezember 2020 von [https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRMs\\_for\\_Strategic\\_Technologies\\_and\\_Sectors\\_in\\_the\\_EU\\_2020.pdf](https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRMs_for_Strategic_Technologies_and_Sectors_in_the_EU_2020.pdf).
- Bogner, A., Littig, B. und Menz, W. (2014). *Interviews mit Experten. Eine praxisorientierte Einführung*. Wiesbaden: Springer.
- Botelho Junior, A., Espinosa, D., Vaughan, J. und Tenório, J. (2021). Recovery of scandium from various sources: A critical review of the state of the art and future prospects. *Minerals Engineering*, 176. doi:10.1016/j.mineng.2021.107148.
- BP. (2021). *Statistical Review of World Energy 2021*. Abgerufen am 28. Januar 2021 von <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>.
- Brauers, J. und Weber, M. (1988). A new method of scenario analysis for strategic planning. *Journal of Forecasting*, 7 (1), 31 - 47. doi:<https://doi.org/10.1002/for.3980070104>.
- Breiter, K., Hlozkova, M., Korbelova, Z. und Galiova, M. V. (2019). Diversity of lithium mica compositions in mineralized granite-greisen system: Cínovec-Li-Sn-W deposit, Erzgebirge. *Ore Geology Reviews*, 106, S. 12 - 27.
- BRGM. (2022). *EuGeLi: Lithium extraction from geothermal brines in Europe (17. Januar 2022)*. Abgerufen am 26. Januar 2022 von <https://www.brgm.fr/en/current-project/eugeli-lithium-extraction-geothermal-brines-europe>.
- Bridge, G. und Faigen, E. (2022). Towards the lithium-ion-battery production network: Thinking beyond mineral supply chains. *Energy Research & Social Science*, 89. doi:<https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102659>.
- Bullock, R. L. (2011). Mineral Property Feasibility Studies. In *SME Mining Engineering Handbook* (3. Ausg., S. 227 - 262). Peter Darling, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (U.S.).
- Bundesgesetzblatt. (2021). *Erstes Gesetz zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes vom 18. August 2021, Teil I*, 59. Bonn.
- Bundesnetzagentur. (2018). *Leitfaden zum Einspeisemanagement*, 55 S. Bonn. Abgerufen am 14. Dezember 2022 von [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen\\_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Einspeisemanagement/Leitfaden3\\_0\\_E/Leitfaden3.0final.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Einspeisemanagement/Leitfaden3_0_E/Leitfaden3.0final.pdf?__blob=publicationFile&v=3).

- Bundesnetzagentur. (2021). *Regelungen zu Stromspeichern im deutschen Strommarkt*, 24 S. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. Abgerufen am 11. Dezember 2022 von [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen\\_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Speicherpapier.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Speicherpapier.html).
- Bundesnetzagentur. (2022). *smard - Strommarktdaten*. Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.smard.de/home>
- Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt. (2022). Monitoringbericht 2022. *Monitoringbericht gem. § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB*, 546 S. Bonn: Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt. Abgerufen am 19. Dezember 2022 von [https://www.bundeskartellamt.de/SharedDocs/Publikation/DE/Berichte/Energie-Monitoring-2022.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bundeskartellamt.de/SharedDocs/Publikation/DE/Berichte/Energie-Monitoring-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=4).
- Bundesrechnungshof. (2015). Bemerkungen Nr. 22 - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie stellt Förderprogramm Explo- ein. Bonn. Abgerufen am 03. Januar 2022 von <https://www.bundesrechnungshof.de/de/veroeffentlichungen/produkte/bemerkungen-jahresberichte/jahresberichte/2015/teil-iii-einzelplanbezogene-entwicklung-und-pruefungsergebnisse/bundesministerium-fuer-wirtschaft-und-energie/>.
- Bundesregierung. (2011). *Abkommen zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der Regierung der Mongolei über Zusammenarbeit im Rohstoff-, Industrie- und Technologiebereich vom 13. Oktober 2011*. Ulan Bator. Abgerufen am 18. Januar 2022 von [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abkommen-zwischen-brd-und-mongolei-zusammenarbeit-rohstoff-industrie-technologie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abkommen-zwischen-brd-und-mongolei-zusammenarbeit-rohstoff-industrie-technologie.pdf?__blob=publicationFile&v=1).
- Bundesregierung. (2012). *Abkommen zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der Regierung der Republik Kasachstan über Zusammenarbeit im Rohstoff-, Industrie- und Technologiebereich vom 08. Februar 2012*. Berlin. Abgerufen am 18. Januar 2022 von [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abkommen-zwischenbrd-und-kasachstan-partnerschaft-rohstoff-industrie-und-technologiebereich.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abkommen-zwischenbrd-und-kasachstan-partnerschaft-rohstoff-industrie-und-technologiebereich.pdf?__blob=publicationFile&v=1).
- Bundesregierung. (2015). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2015 Teil II Nr. 18. *Abkommen zwischen der Regierung der Bundesrepublik Deutschland und der Regierung der Republik Peru über Zusammenarbeit im Rohstoff-, Industrie- und Technologiebereich vom 14. Juli 2014*. Bonn. Abgerufen am 18. Februar 2022 von [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abkommen-zwischen-brd-und-peru-partnerschaft-rohstoff-industrie-und-technologiebereich.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abkommen-zwischen-brd-und-peru-partnerschaft-rohstoff-industrie-und-technologiebereich.pdf?__blob=publicationFile&v=6).
- Bundesregierung. (2018). *Fachkräftestrategie der Bundesregierung*. Berlin. Abgerufen am 03. Januar 2022 von [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/F/fachkraeftstrategie-der-bundesregierung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/F/fachkraeftstrategie-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=4).

- Bundesregierung. (2019). *Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050*, 173 S. Berlin. Abgerufen am 09. November 2022 von <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1>.
- Bundesregierung. (2019). *Industriestrategie 2030 – Leitlinien für eine deutsche und europäische Industriepolitik*, 40 S. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Abgerufen am 12. Dezember 2020 von <https://www.bundesregierung.de/bregde/service/publikationen/industriestrategie-2030-1700830>.
- Bundesregierung. (2020). *Nationaler Energie- und Klimaplan beschlossen. Mitteilung vom 10. Juli 2020*. Berlin. Abgerufen am 09. November 2022 von <https://www.bundesregierung.de/bregde/themen/klimaschutz/energiewende-1758720>.
- Bundesregierung. (2020a). *Die Nationale Wasserstoffstrategie*, 32 S. Berlin: Bundeswirtschaftsministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Abgerufen am 21. September 2021 von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>.
- Bundesregierung. (2021). Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Oliver Luksic, Sandra Weeser, Michael Theurer, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP. *Umsetzungsstand des Handlungskonzepts Stahl (Drucksache 19/26111)*. Berlin: Deutscher Bundestag.
- Bundesregierung. (2022). *Wasserstoff – Energieträger der Zukunft. Mitteilung vom 07. Juni 2022*. Berlin. Abgerufen am 16. Oktober 2022 von <https://www.bundesregierung.de/bregde/themen/klimaschutz/wasserstoff-technologie-1732248>.
- Bundesverband Geothermie. (2020). *Rittershofen – Geothermieanlage*. Abgerufen am 07. November 2022 von <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/r/rittershoffen-geothermieanlage.html>.
- Bünzli, J.-G. und McGill, I. (2018). Rare Earth Elements. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (S. 53 S.). Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Carmo, M., Keeley, G., Holtz, D., Grube, T., Robinius, M., Müller, M. und Stolten, D. (2019). PEM water electrolysis: Innovative approaches towards catalyst separation, recovery and recycling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, S. 3450 - 3455. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.12.030.
- Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B. und Pavel, C. (2020). *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system*, 74 S. Luxembourg: Publication Office of the European Union. doi:10.2760/160859.
- CDU/CSU. (2010). Strategy Paper of the CDU/CSU Parliamentary Group. *Securing Germany's and Europe's supply of raw materials*, 11 S. Berlin. Abgerufen am 29. März 2021 von

- [https://www.cducsu.de/sites/default/files/benutzer/19/dateien/100707\\_rohstoffstrategie\\_english.pdf](https://www.cducsu.de/sites/default/files/benutzer/19/dateien/100707_rohstoffstrategie_english.pdf).
- Chitrakar, R., Kanoh, H., Yoshitaka, M. und Ooi, K. (2001). Recovery of Lithium from Seawater Using Manganese Oxide Adsorbent (H<sub>1.6</sub>Mn<sub>1.6</sub>O<sub>4</sub>). Derived from Li<sub>1.6</sub>Mn<sub>1.6</sub>O<sub>4</sub>. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40 (9), S. 2054 - 2058. doi:<https://doi.org/10.1021/ie000911h>.
- Choubey, P., Chung, K.-S., Kim, M., Lee, J. und Srivastava, R. (2017). Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element Lithium. Part II: From sea water and spent lithium ion batteries. *Minerals Engineering*, 110, S. 104 - 121. doi:10.1016/j.mineng.2017.04.008.
- Chung, K., Lee, J., Kim, E., Lee, K., Kim, Y. und Ooi, K. (2004). Recovery of lithium from seawater using nano-manganese oxide adsorbents prepared by gel process. *Material Science Forum*, 449-452, S. 277 - 280. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.449-452.277>.
- CIC energiGUNE. (2021). Gigafactories: Europe's major commitment to economic recovery through the development of battery factories. Abgerufen am 21. Juli 2022 von: <https://cicenergigune.com/en/blog/gigafactories-europe-commitment-economic-recovery-battery-factories>.
- CIM Standing Committee on Reserve Definitions. (2014). CIM Definition Standards for Mineral Resources & Mineral Reserves. 12 S. Westmount: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Abgerufen am 28. Oktober 2022 von [https://mrmr.cim.org/media/1128/cim-definition-standards\\_2014.pdf](https://mrmr.cim.org/media/1128/cim-definition-standards_2014.pdf).
- Clement, H. (1971). Rohstoffe für Europas Wirtschaft. *Wirtschaftsdienst*, ISSN 0043-6275, 51 (4), S. 211 - 214.
- Cornish Lithium Ltd. (2022). *United Downs*. Abgerufen am 23. März 2022 von <https://cornishlithium.com/projects/lithium-in-geothermal-waters/united-downs/>.
- Cousse, J., Trutnevyte, E. und Hahnel, U. J. (2021). Tell me how you feel about geothermal energy: Affect as a revealing factor of the role of seismic risk on public acceptance. *Energy Policy*, 158. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112547>.
- Cowley, A. (2022). *PGM Market Report*, 60 S. Johnson Matthey. Abgerufen am 02. Januar 2023 von <https://matthey.com/documents/161599/509428/PGM-market-report-May-2022.pdf/542bcada-f4ac-a673-5f95-ad1bbfca5106?t=1655877358676>.
- Dannreuther, R. (2013). Geopolitics and International Relations of Resources. In R. Dannreuther und W. Ostrowski, . *In: Global Resources Conflict and Cooperation* (276 S.). Houndmills, NY.
- David, M., Ocampo-Martínez, C. und Sánchez-Peña, R. (2019). Advances in alkaline water electrolyzers: A review. *Journal of Energy Storage*, 23, S. 392 - 403. doi:10.1016/j.est.2019.03.001.

- De Launey, G. (2022). *Serbia revokes Rio Tinto lithium mine permits following protests (21. Januar 2022)*. Abgerufen am 02. Februar 2022 von <https://www.bbc.com/news/world-europe-60081853>.
- Demony, C. (2022). *Portuguese community files legal action against lithium mining company*. Abgerufen am 26. September 2022 von Reuters online vom 22. Juli 2022: <https://www.reuters.com/article/portugal-lithium-idUSL8N2Z33JZ>.
- DERA. (2012). DERA Rohstoffinformationen 13. Deutschland – Rohstoffsituation 2011, 156 S. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (DERA).
- DERA. (2014). DERA-Rohstoffliste 2014. *DERA-Rohstoffinformationen 24*, 112 S. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (DERA). Abgerufen am 12. März 2022 von [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-24.pdf;jsessionid=46F1465465026CC33EA1DC7C090917DF.internet972?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-24.pdf;jsessionid=46F1465465026CC33EA1DC7C090917DF.internet972?__blob=publicationFile&v=4).
- DERA. (2019). DERA Rohstoffinformationen 40. *DERA Rohstoffliste 2019*, 116 S. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (DERA).
- DERA. (2021). DERA Rohstoffinformationen 49. *DERA Rohstoffliste 2021*, 108 S. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- DERA. (2021a). Rohstofftrends Q4/21. 13 S. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- DERA. (2021b). DERA Themenheft. *Batterierohstoffe für die Elektromobilität*, 26 S. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur. Abgerufen am 02. Februar 2022 von <https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-21.html>.
- DERA. (2021c). Informationsmaterial. *Seltene Erden*, 7 S. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Abgerufen am 18. März 2023 von [https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Aktuelles/rohstoff\\_seltene\\_erden.html](https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Aktuelles/rohstoff_seltene_erden.html).
- DERA. (2022). *Mineralische Rohstoffe für die Wasserelektrolyse*, 26, 28 S. Berlin: DERA Themenheft. Von <https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-22.pdf>. abgerufen
- DERA. (2022a). Chart des Monats, Januar 2022. *Steigende Energiekosten sorgen für Produktionskürzungen*. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Abgerufen am 01. Februar 2022 von [189](https://www.deutsche-</a></p></div><div data-bbox=)

- rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%202022\_cdm\_01\_Energiekosten.pdf;jsessionid=1D23DBD8129C8B7E4D279D8D505EB19B.2\_cid292?\_\_blob=publicationFile&v=2.
- DESTATIS. (2008). *Klassifikation der Wirtschaftszweige. Mit Erläuterungen*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 12. November 2020 von <https://www.destatis.de/static/DE/dokumente/klassifikation-wz-2008-3100100089004.pdf>.
- DESTATIS. (2021a). Außenhandel. *GENESIS-Tabelle 51000-0007*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- DESTATIS. (2021b). VGR des Bundes. *GENESIS-Tabelle 81000-0103*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- DESTATIS. (2021c). VGR des Bundes. *GENESIS-Tabelle 81000-0013*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- DESTATIS. (2021d). Außenhandel. *GENESIS-Tabelle 51000-0005*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- DESTATIS. (2021e). Vierteljährliche Produktionserhebung im Verarbeitenden Gewerbe. *GENESIS-Tabelle 42131-0003*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- DESTATIS. (2021f). Studienanfänger. *GENESIS-Tabelle 21311-0012*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- DESTATIS. (2021g). Beschäftigte und Umsatz der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe. *GENESIS-Tabelle 42111-0003*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- DESTATIS. (2021h). Außenhandel. *GENESIS-Tabelle 51000-0009*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- DESTATIS. (2022). *Daten zur Energiepreisentwicklung. Mitteilung vom 04. November 2022*. Abgerufen am 05. November 2022 von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Publikationen/Energiepreise/energiepreisentwicklung-pdf-5619001.html>.
- DESTATIS. (2022a). *GENESIS-Tabelle 81000-0013: VGR des Bundes – Bruttowertschöpfung (nominal/preisbereinigt): Deutschland, Jahre, Wirtschaftsbereiche*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 16. Oktober 2022 von <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>.
- DESTATIS. (2022b). *GENESIS-Tabelle 81000-0001: VGR des Bundes – Bruttowertschöpfung, Bruttoinlandsprodukt (nominal/preisbereinigt): Deutschland, Jahre*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 18. Dezember 2022 von <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>.

- DESTATIS. (2022c). *GENESIS-Tabelle: 81000-0103; VGR des Bundes – Bruttowertschöpfung (nominal/preisbereinigt): Deutschland, Jahre, Wirtschaftsbereiche*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 18. Dezember 2022 von <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>.
- DESTATIS. (2022d). *GENESIS-Tabelle: 13321-0001: Erwerbstätige: Deutschland, Monate, Inlands-/Inländerkonzept, Original- und bereinigte Daten*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 18. Dezember 2022 von <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>.
- DESTATIS. (2022e). *Umweltökonomische Gesamtrechnung. Anthropogene Luftemissionen. Berichtszeitraum 2000–2020. Version vom 29. September 2022*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt. Abgerufen am 28. Dezember 2022 von <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/energiefluesse-emissionen/Publikationen/Downloads/anthropogene-luftemissionen-5851103207004.html>.
- Deutsche Windguard. (2020). *Volllaststunden von Windenergieanlagen an Land – Entwicklung, Einflüsse, Auswirkungen*, 54 S. Varel: Bundesverband WindEnergie e. V. Abgerufen am 25. November 2022 von [https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto\\_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2020/Volllaststunden%20von%20Windenergieanlagen%20an%20Land%202020.pdf](https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2020/Volllaststunden%20von%20Windenergieanlagen%20an%20Land%202020.pdf).
- Deutsche-Lithium. (2021). Zinnwald-Lithium-Projekt. Abgerufen am 07. Dezember 2021 von <http://www.deuschelithium.de/projekte/zinnwald-lithium-projekt/>.
- Deutscher Bundestag. (2017). Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung – Drucksache 18/13689. *Technikfolgenabschätzung (TA) Online-Bürgerbeteiligung an der Parlamentsarbeit*. Abgerufen am 07. Dezember 2021 von <https://dserver.bundestag.de/btd/18/136/1813689.pdf>.
- Deutscher Bundestag. (2019). Dokumentation WD 5 – 3000 033/1. *Erdölverbrauch in Deutschland*. Wissenschaftliche Dienste. Abgerufen am 13. Januar 2022 von <https://www.bundestag.de/resource/blob/644154/889aae5fb78d87042e942a3774f4df1d/W-D-5-033-19-pdf-data.pdf>.
- Deutscher Bundestag. (2020). Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Marcel Klinge, Michael Theurer, Reinhard Houben, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/17808. *UFK-Garantien des Bundes im Rohstoffbereich*. Abgerufen am 22. Dezember 2021 von <https://dserver.bundestag.de/btd/19/178/1917808.pdf>.
- Deutscher Bundestag. (2020a). Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Marcel Klinge, Olaf in der Beek, Michael Theurer, weiterer Abgeordneter

- und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/17224. *Rohstoffpartnerschaften*. Abgerufen am 22. Dezember 2021 von <https://dserver.bundestag.de/btd/19/172/1917224.pdf>.
- Deutscher Bundestag. (2021). Gesetzentwurf der Bundesregierung. Drucksache 19/28402. *Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Bundesberggesetzes und zur Änderung der Verwaltungsgerichtsordnung*. Abgerufen am 05. Dezember 2021 von <https://dserver.bundestag.de/btd/19/284/1928402.pdf>.
- Deutscher Bundestag. (2022). Gesetzentwurf der Fraktionen SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP – Drucksache 20/1024. *Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes zur Einführung von Füllstandsvorgaben für Gasspeicheranlagen*. Abgerufen am 29. Mai 2022 von <https://dserver.bundestag.de/btd/20/010/2001024.pdf>.
- Di Persio, F., Huisman, J., Bobba, S., Alves Dias, P., Blengini, G. A. und Blagoeva, D. (2020). Information gap analysis for decision makers to move EU towards a circular economy for the lithium-ion battery value chain. 92 S. Luxemburg: Publications Office of the European Union. Abgerufen am 30. August 2022 von <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC121140>.
- Diallo, M., Kotte, M. und Cho, M. (2015). Mining critical metals and elements from seawater: opportunities and challenges. *Environ. Sci. Technol.*, 49 (16), S. 9390–9399. doi:10.1021/acs.est.5b00463.
- DIHK. (2022). *Wie Unternehmen auf die hohen Strom-, Gas- und Kraftstoffpreise reagieren*. Mitteilung vom 02. November 2022. Abgerufen am 05. November 2022 von <https://www.dihk.de/de/themen-und-positionen/wirtschaftspolitik/konjunktur-und-wachstum/konjunkturumfrage-herbst-2022/wie-unternehmen-auf-die-hohen-strom-gas-und-kraftstoffpreise-reagieren-85008>.
- DLR. (2018). *H2ORIZON - neue Anlage für regenerative Wasserstoffherzeugung*. Pressemitteilung vom 05. Juli 2018. Stuttgart: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Abgerufen am 28. Dezember 2022 von [https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/3/20180705\\_h2orizon-neue-anlage-fuer-regenerative-wasserstoffherzeugung\\_28767.html](https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/3/20180705_h2orizon-neue-anlage-fuer-regenerative-wasserstoffherzeugung_28767.html).
- Döhrn, R. und Janßen-Timmen, R. (2012). *Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Stahlindustrie*, Heft 71, 43 S. Essen: Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (rwi). Abgerufen am 17. Dezember 2020 von <https://www.rwi-essen.de/publikationen/wissenschaftlich/rwi-materialien/detail/die-volkswirtschaftliche-bedeutung-der-stahlindustrie-2444>.
- dpa. (2021). Batterietechnik. *Forscher wollen Lithium aus Grubenwasser gewinnen*. Abgerufen am 02. März 2022 von <https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/batterietechnik-forscher-wollen-lithium-aus-grubenwasser-gewinnen-a-cb65e762-8ca2-424a-9794-32b1c1181878>.

- dpa. (2022). Voerst keine Batteriezellenfabrik in Bitterfeld-Wolfen. *ZEIT online vom 23. Mai 2022*. Abgerufen am 03. Juli 2022 von <https://www.zeit.de/news/2022-05/23/vorerst-keine-batteriezellenfabrik-in-bitterfeld-wolfen>.
- Draxler, M., Sormann, A., Kempken, T., Hauck, T., Pierret, J.-C., Borlee, J., Di Donato, A., De Santis, M., Wang, C. (2021). *Technology Assessment and Roadmapping. Green Steel for Europe*, 90 S. Green Steel for Europe Consortium. Abgerufen am 20. Oktober 2022 von <https://www.estep.eu/assets/Uploads/D1.2-Technology-Assessment-and-Roadmapping.pdf>.
- Duffner, F., Kronemeyer, N., Tübke, J., Leker, J., Winter, M. und Schmuch, R. (2021). Post-lithium-ion battery cell production and its compatibility with lithium-ion cell production infrastructure. *Nature Energy*, 6, S. 123 - 134. doi:<https://doi.org/10.1038/s41560-020-00748-8>.
- DUSD(S&T) – Deputy Under Secretary of Defense for Science and Technology. (2003). *Technology Readiness Assessment (TRA) Deskbook*. 168 S. Unites States of America: Department of Defense. Abgerufen am 15. September 2022 von <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA418881.pdf>.
- EBV. (2021). Informationsbroschüre. 12 S. Erdölbevorratungsverband. Abgerufen am 02. Dezember 2021 von [https://www.ebv-oil.org/cms/pdf/EBV\\_Informationsbroschuere\\_esa.pdf](https://www.ebv-oil.org/cms/pdf/EBV_Informationsbroschuere_esa.pdf).
- EEG. (2021). Erneuerbare-Energien-Gesetz. *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien*. Abgerufen am 09. November 2022 von [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2014/EEG\\_2021.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2021.pdf).
- EEG. (2023). Erneuerbare-Energien-Gesetz (01. Januar 2023). *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien*. Abgerufen am 04. Januar 2023 von [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2014/EEG\\_2023.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2023.pdf).
- Eisenhardt, E. und Graebner, M. (2007). Theory of building from cases: opportunities and challenges. *Academy of Management Journal*, 50 (1), 25 - 32.
- EIT Raw Materials. (2019). *EuGeLi – European geothermal lithium brines*. Abgerufen am 26. Januar 2022 von <https://eitrawmaterials.eu/project/eugeli/>.
- EIT Raw Materials. (2020). *EuGeLi project extracting European lithium for future electric vehicle batteries (14.09.2020)*. Abgerufen am 26. Januar 2022 von <https://eitrawmaterials.eu/eugeli-project-extracting-european-lithium-for-future-electric-vehicle-batteries/>.
- EIT Raw Materials@School. (2021). *RM@Schools*. Von <https://rmschools.isof.cnr.it/about.html> abgerufen.

- EnBW. (2022). *Grün, blau, türkis... das bedeuten die Wasserstoff-Farben*. Karlsruhe: EnBW. Abgerufen am 28. Dezember 2022 von <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/wasserstoff-farben.html>.
- Enercon. (2019). Windblatt – 03/2019. EP5-Programm Komponenten für Prototypen in Produktion. 15 S. Abgerufen am 28. Dezember 2022 von [https://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien-Portal/windblatt/pdf/Windblatt\\_03\\_19\\_DE.pdf](https://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien-Portal/windblatt/pdf/Windblatt_03_19_DE.pdf).
- Enercon. (2022). Technische Datenblätter. *Produktportfolio*. Enercon GmbH. Abgerufen am 28. Dezember 2022 von [https://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien-Portal/EC\\_WEA\\_DE.pdf](https://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien-Portal/EC_WEA_DE.pdf).
- ERAMET. (2019). *EuGeLi project: extracting European Lithium for future electric vehicle batteries*. Abgerufen am 26. Januar 2022 von <https://www.eramet.com/en/activities/innovate-design/eugeli-project>.
- Erdmann, L. und Behrendt, S. (2011). Abschlussbericht. *Kritische Rohstoffe für Deutschland*, 134 S. Berlin: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (ITZ).
- Ericsson, M., Löf, O. und Löf, A. (2020). Chinese control over African and global mining – past, present and future. *Mineral Economics*, 33, 153 - 181. doi:0.1007/s13563-020-00233-4.
- EU-Kommission. (2003). 2003/361/EG. *Empfehlung der Kommission vom 06. Mai 2003 betreffend der Definition der Kleinunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen*. Amtsblatt der Europäischen Kommission.
- EU-Kommission. (2018). *Report on critical raw materials and the circular economy*, 80 S. Luxemburg: Publication Office of the European Union. Abgerufen am 07. März 2020 von <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d1be1b43-e18f-11e8-b690-01aa75ed71a1/language-en>.
- EU-Kommission. (2019). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen (640 final). *Der europäische Grüne Deal (11. Dezember 2019)*, 29 S. Brüssel: EU-Kommission. Abgerufen am 07. Juli 2021 von [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication\\_de.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/european-green-deal-communication_de.pdf).
- EU-Kommission. (2020). *Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020 (10. Dezember 2020)*, 143 S. Brüssel: EU-Kommission. Abgerufen am 28. April 2022 von [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:4b5d88a6-3ad8-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0019.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:4b5d88a6-3ad8-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0019.02/DOC_1&format=PDF).
- EU-Kommission. (2020a). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den

- Ausschuss der Regionen (474 final). *Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken* (03. September 2020), 27 S. Brüssel: EU-Kommission. Abgerufen am 30. November 2020 von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>.
- EU-Kommission. (2020b). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen (102 final). *Eine neue Industriestrategie für Europa* (10. März 2020), 21 S. Brüssel: EU-Kommission. Abgerufen am 09. Dezember 2020 von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0102&from=EN>.
- EU-Kommission. (2020c). *Speech by Commissioner Breton at the launch of the European Raw Materials Alliance (Pressemitteilung vom 29. September 2020)*. Abgerufen am 18. August 2022 von [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/speech\\_20\\_1776](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/speech_20_1776).
- EU-Kommission. (2020d). Projektbeschreibung. *Development of radical innovations to recover minerals and metals from seawater desalination brines*. Europäische Kommission. doi:10.3030/869703.
- EU-Kommission. (2021). *Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631*, 40 S. Brüssel: EU-Kommission. Abgerufen am 10. Juni 2022 von [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:870b365e-eecc-11eb-a71c-01aa75ed71a1.0015.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:870b365e-eecc-11eb-a71c-01aa75ed71a1.0015.02/DOC_1&format=PDF).
- EU-Kommission. (2022). *Ukraine: EU agrees fourth package of restrictive measures against Russia. Pressemitteilung vom 15. März 2022*. Brüssel: Europäische Kommission. Abgerufen am 17. März 2022 von [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_1761](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1761).
- EU-Kommission. (2023). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen (62 final). *Ein Industriepfad zum Grünen Deal für das klimaneutrale Zeitalter* (01.02.2023), 26 S. Brüssel: EU-Kommission, abgerufen am 28. März 2023 von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023DC0062&from=EN>.
- EuroLithium. (2022). *Project Euro Lithium+Borates*. Abgerufen am 18. Oktober 2022 von <https://www.eurolithium.com/assets1>.
- European Lithium Ltd. (2021). *Wolfsberg Lithium Project, corporate presentation February 2021*. Abgerufen am 08. März 2022 von [https://europeanlithium.com/wp-content/uploads/2021/03/210201-European-Lithium-Presentation\\_Feb-2021FINAL.pdf](https://europeanlithium.com/wp-content/uploads/2021/03/210201-European-Lithium-Presentation_Feb-2021FINAL.pdf).
- European Lithium Ltd. (2022). *European Lithium partners with BMW AG to supply battery grade lithium hydroxide. Pressemitteilung vom 05. August 2022*. Abgerufen am 15. August 2022 von <https://wcsecure.weblink.com.au/pdf/EUR/02550202.pdf>.

- European Metals Holding Ltd. (2021). *Quarterly Report September 2021*. Abgerufen am 08. März 2022 von <https://www.londonstockexchange.com/news-article/EMH/quarterly-report/15079423>.
- European Metals Holding Ltd. (2022). *PFS Update delivers outstanding results. Pressemitteilung vom 19. Januar 2022*. Abgerufen am 08. März 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/emh/7381a65f-d0b.pdf>.
- Eurostat. (2016). *Gewicht der einzelnen Wirtschaftszweige. Pressemitteilung vom 21. Oktober 2016*. Brüssel: Eurostat-Pressestelle. Abgerufen am 12. November 2020 von <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/7715723/2-27102016-AP-DE.pdf/3c5e8edc-e61b-491e-8384-e84248714c2d?t=1477493192000>.
- Eurostat. (2020). *Wertschöpfung nach NACE Rev. 2*. Brüssel: Europäische Kommission. Abgerufen am 13. November 2020 von <https://data.europa.eu/data/datasets/tn05bpvlrf77uxooc0vgw?locale=de>.
- Evonik. (2020). *Evonik wants to make green hydrogen more affordable*. Pressemitteilung vom 18. Juni 2020. Essen: Evonik Industries AG. Retrieved Januar 18, 2023, from <https://corporate.evonik.com/en/media/press-releases/corporate/evonik-wants-to-make-green-hydrogen-more-affordable-134037.html>.
- ewi. (2021). *Dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Klimaneutralität 2045 – Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems – Gutachterbericht, OKT 2021*. Köln: Energiewirtschaftliches Institut Köln. Abgerufen am 05. November 2022 von <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/dena-ls2/>.
- ewi. (2022). *Energiepreise in Europa bleiben mittelfristig auf hohem Niveau. Mitteilung vom 14. Juli 2022*. Köln: Energiewirtschaftliches Institut Köln. Abgerufen am 05. November 2022 von <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/aktuelles/esys/>.
- ewi. (2022a). *Versorgungslücken auf dem Strommarkt bis 2030 möglich. Pressemitteilung vom 29. September 2022*. Köln: Energiewirtschaftliches Institut Köln. Abgerufen am 28. Dezember 2022 von <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/aktuelles/versorgungssicherheit-bis-2030/>.
- EY. (2021). *Workshop. BMWi: Gutachten zum Genehmigungsverfahren zum Rohstoffabbau in Deutschland*, 31 S.
- Faget, J. (2021). *Portugal: Lithium-Krieg hinter den Bergen (01. September 2021)*. *Deutsche Welle online*. Abgerufen am 23. September 2021 von <https://www.dw.com/de/portugal-lithium-krieg-hinter-den-bergen/a-59040654>.
- Farooki, M. (2018). *European Policy Brief. China's Mineral Sector and the Belt & Road Initiative*, 2, 11 S. Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe (STRADE). Abgerufen am 06. Dezember 2021 von [https://stradeproject.eu/fileadmin/user\\_upload/pdf/STRADE\\_PB\\_02-2018\\_One\\_Belt\\_One\\_Road.pdf](https://stradeproject.eu/fileadmin/user_upload/pdf/STRADE_PB_02-2018_One_Belt_One_Road.pdf).

- Farooki, M. (2018a). *Non-European country engagement with resource-rich developing countries*. London: Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe (STRADE). Abgerufen am 06. Dezember 2021 von [https://www.stradeproject.eu/fileadmin/user\\_upload/pdf/STRADE\\_Report\\_01\\_2018\\_Third\\_Country\\_Approaches\\_Min\\_Dev\\_Res\\_Rich.pdf](https://www.stradeproject.eu/fileadmin/user_upload/pdf/STRADE_Report_01_2018_Third_Country_Approaches_Min_Dev_Res_Rich.pdf).
- Fatima, H., Zhong, Y., Wua, H. und Shao, Z. (2021). Recent advances in functional oxides for high energy density sodium-ion batteries. *Material Reports: Energy*, 1 (2). doi:<https://doi.org/10.1016/j.matre.2021.100022>.
- Fernandez, V. (2017). Rare-earth elements market: A historical and financial perspective. *Resources Policy*, 53, S. 26 - 45. doi:[10.1016/j.resourpol.2017.05.010](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.010).
- FFP. (2022). Fragile States Index Annual Report 2022. Washington: The Fund for Peace. Retrieved Januar 30, 2023, from <https://fragilestatesindex.org/wp-content/uploads/2022/07/22-FSI-Report-Final.pdf>.
- Fichtner, M., Edström, K., Ayerbe, E., Berecibar, M., Bhowmik, A., Castelli, I. E., Clark, S., Dominko, R., Erakca, M., Franco, A. A., Grimaud, A., Horstmann, B., Latz, A., Lormann, H., Meeus, M., Narayan, R., Pammer, F., Ruhland, J., Stein, H., Weil, M. (2021). Rechargeable batteries of the future – The State of the Art from a BATTERY 2030+ Perspective. *Advanced Energy Materials*, 12, 25. doi:<https://doi.org/10.1002/aenm.202102904>.
- Figgenger, J., Hecht, C., Haberschusz, D., Bors, J., Spreuer, K.G., Kairies, K.-P., Stenzel, P. und Sauer, D. U. (2023). The development of battery storage systems in Germany: A market review (status 2023). 29 S. doi:[10.48550/arXiv.2203.06762](https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.06762).
- Flach, L., Aichele, R. und Braml, M. (2020). Status quo und Zukunft globaler Lieferketten. In H. Görg, *Neustart der Industrie unter dem Einfluss von COVID-19: Wie bereit ist die globale Lieferkette?* (Bd. 73, S. 3 - 34). München: ifo Schnelldienst.
- Flerus, B. und Friedrich, B. (2020). Recovery of gallium from smartphones – Part II: Oxidative alkaline pressure leaching of gallium from pyrolysis residue. *MDPI Metals*, 10 (1565). doi:[10.3390/met10121565](https://doi.org/10.3390/met10121565).
- Fraunhofer ISI. (2021). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland – Treibhausgas-neutrale Hauptszenarien, enertile-Ergebnisse: H2-Nachfrage regionalisiert, 2021. Abgerufen am 05. November 2022 von <https://enertile-explorer.isi.fraunhofer.de:8443/open-view/27973/94ca1786486eb88bb6c5fc4a49b98fdd>.
- Fraunhofer IWES. (2021). *Windenergieanlagen mit integriertem Elektrolyseur demonstrieren nachhaltige Wasserstoffgewinnung auf See*. Pressemitteilung vom 19. August 2021. Abgerufen am 28. Dezember 2022 von <https://www.iwes.fraunhofer.de/de/presse/archiv-2021/windenergieanlagen-mit-integriertem-elektrolyseur-demonstrieren-.html>.
- Gale, D. (1955). The law of supply and demand. *Mathematica Scandinavica*, 3 (1), 155 - 169.

- Gatzen, C. und Reger, M. (2022). *Verfügbarkeit und Kostenvergleich von Wasserstoff – Merit Order für klimafreundliche Gase in 2030 und 2045*, 40 S. Bonn: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. Abgerufen am 31. Januar 2023 von <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g202116-1-dvgw-verfuegbarkeit-kostenvergleich-h2.pdf>.
- Gauß, R., Burkhardt, C., Carencotte, F., Gasparon, M., Gutfleisch, O., Higgins, I., Karajic, M., Klossek, A., Mäkinen, M., Schäfer, B., Schindler, R., Veluri, B. (2021). A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster. *Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action*, 38 S. Berlin: ERMA – European Raw Material Alliance. Abgerufen am 28. Dezember 2022 von <https://erma.eu/app/uploads/2021/09/01227816.pdf>.
- GEO<sup>3</sup>. (2021). *GeoCubed selects GeoLith's Li-Capt® DLE Technology for United Downs Pilot Plant and Deep Geothermal Water Samples Successfully Obtained Following GEL Pump Test. Pressemitteilung vom 22. Juli 2021*. Abgerufen am 23. März 2022 von <https://geocubed.co.uk/news/geocubed-selects-geoliths-li-capt-dle-technology-for-united-downs-pilot-plant-and-deep-geothermal-water-samples-successfully-obtained-following-gel-pump-test/>.
- GEO<sup>3</sup>. (2022). *Co-production of geothermal energy and low-carbon lithium*. Abgerufen am 23. März 2022 von <https://cornishlithium.com/projects/lithium-in-geothermal-waters/geocubed/>.
- Geothermal Engineering Ltd. (2021). *Geothermal Engineering Ltd. confirms highest global concentration of lithium in geothermal fluid at its United Downs site (Pressemitteilung 11. August 2021)*. Abgerufen am 15. Januar 2022 von <https://geothermalengineering.co.uk/lithium-august/>.
- GERRI. (2021). Positionspapier 2021. *Verantwortungsvolle Rohstoffversorgung – Innovationshebel für eine ressourceneffiziente, klimaneutrale und kreislauforientierte Rohstoffwirtschaft*, 21 S. Abgerufen am 17. November 2021 von <https://www.gerri-germany.org/files/gerri/GERRI%20Positionspapier%202021%20-%20Verantwortungsvolle%20Rohstoffversorgung.pdf>.
- GG. (1949). Grundgesetz (23. Mai 1949) Bundesgesetzblatt Teil 1. Bundesanzeiger. Abgerufen am 10. Januar 2023 von [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F\\*%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl149001.pdf%27%5D#\\_\\_bgbl\\_\\_%2F%2F\\*%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl149001.pdf%27%5D\\_\\_1673340401382](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl149001.pdf%27%5D#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl149001.pdf%27%5D__1673340401382).
- Gielen, D. und Lyons, M. (2022). *Critical materials for the energy transition: Lithium*, 36 S. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Abgerufen am 23. August 2022 von <https://www.irena.org/Technical-Papers/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition-Lithium>.

- Gils, H., Gardian, H. und Schmutge, J. (2021). Interaction of hydrogen infrastructures with other sector coupling options towards a zero-emission energy system in Germany. *Renewable Energy*, 180, S. 140 - 156. doi:10.1016/j.renene.2021.08.016.
- Gläser, J. und Laudel, G. (2010). *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Goldinvest. (2021). *Fitch: Lithiumpreise werden weiter steigen (16. November 2021)*. Abgerufen am 30. April 2022 von <https://goldinvest.de/mining-resources/fitch-lithiumpreise-werden-weiter-steigen>.
- Goldinvest. (2022). *Trotz aller Herausforderungen: Lithiumpreis wird extrem hoch bleiben (15. August 2022)*. Abgerufen am 15. August 2022 von <https://goldinvest.de/mining-resources/trotz-aller-herausforderungen-lithiumpreis-wird-extrem-hoch-bleiben>.
- Grant, A., Deak, D., Pell, R. (2020). The CO<sub>2</sub> Impact of the 2020s Battery Quality Lithium Hydroxide Supply Chain. *Minviro*, 14 S. Abgerufen am 08. September 2021 von <https://www.jadecove.com/research/liohco2impact>.
- Grant, A. und Goodenough, K. (2021). *Is there enough Lithium to make all the Batteries?* Abgerufen am 08. September 2021 von Battery Bits: <https://medium.com/batterybits/is-there-enough-lithium-to-make-all-the-batteries-c3a522c01498>.
- GreenH2Atlantic. (2022). *GreenH2Atlantic – Project Description*. Abgerufen am 02. Januar 2023 von <https://www.greenh2atlantic.com/project>.
- Gregoir, L. und van Acker, K. (2022). *Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw material challenge*, 112 S. KU Leuven. Abgerufen am 09. Mai 2022 von <https://eurometaux.eu/media/rqocjybv/metals-for-clean-energy-final.pdf>.
- Grünberg, P. (2021). Keramik-Forum Elektrolyse. *Ein Schlüssel zu grünem Wasserstoff, 1*. Jülich: Keramische Zeitschrift. Abgerufen am 22. Dezember 2022 von <https://link.springer.com/article/10.1007/s42410-021-0458-3>.
- Gurita, N., Fröhling, M. und Bongaerts, J. (2018). Assessing potentials for mobile/smartphone reuse/ remanufacture and recycling in Germany for a closed loop of secondary precious and critical metals. *Journal of Remanufacturing*, 8, S. 1 - 22.
- Hartbrich, I. (2022). *Stahl: Diese Anlagentechnik wird bei Thyssenkrupp und Co. den Hochofen ablösen*. VDI Nachrichten. Retrieved Januar 16, 2023, from <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/werkstoffe/direktreduktion-diese-anlagentechnik-wird-bei-thyssenkrupp-und-co-den-hochofen-abloesen/>.
- Hebling, C., Ragwitz, M., Fleiter, T., Groos, U., Härle, D., Held, A., Jahn, M., Müller, N., Pfeifer, T., Plötz, P., Ranzmeyer, O., Schaadt, A., Sensfuß, F., Smolinka, T., Wietschel, M. (2019). Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, S. 51. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für

- System- und Innovationsforschung ISI & Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- Heimerl, S. und Kohler, B. (2017). Aktueller Stand der Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland. *Wasserwirtschaft*, 10, S. 77 - 29. Retrieved Januar 04, 2023, from [https://www.fwt.fichtner.de/userfiles/fileadmin-fwt/Publikationen/WaWi\\_2017\\_10\\_Heimerl\\_Kohler\\_PSKW.pdf](https://www.fwt.fichtner.de/userfiles/fileadmin-fwt/Publikationen/WaWi_2017_10_Heimerl_Kohler_PSKW.pdf).
- Heimes, H. H., Kampker, A., Wessel, S., Kehrer, M., Michaelis, S. und Rahimzei, E. (2018). *Produktionsprozesse einer Lithium-Ionen-Batterie*, 22 S. RWTH Aachen University Institute for Production Engineering of E-Mobility Components. Abgerufen am 08. August 2022 von [https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show\\_document.asp?id=aaaaaaaaabcgujq](https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabcgujq).
- Helferich, C. (2019). Leitfaden- und Experteninterviews. In N. Baur und J. Blasius, *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung* (S. 669 - 686). Wiesbaden: Springer VS.
- Hennicke, P., Kristof, K. und Dorner, U. (2010). Policy Paper zu Arbeitspaket 7 des Projekts Materialeffizienz und Ressourcenschonung. *Ressourcensicherheit und Ressourceneffizienz – Wege aus der Rohstoffkrise*, 39 S. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie.
- Herrmann, A. G. (1961). Über das Vorkommen einiger Spurenelemente in Salzlösungen aus dem deutschen Zechstein. *Kali Steinsalz*, 3, S. 209 - 220.
- Hilgers, C. und Becker, I. (2020). Lokale Verfügbarkeit von Rohstoffen bei steigender globaler Nachfrage – Aspekte zu resilienten Ressourcenstrategien. *World of Mining*, 72 (5), 254 - 263. Von [https://www.researchgate.net/publication/349829218\\_Local\\_availability\\_of\\_raw\\_materials\\_and\\_increasing\\_global\\_demand\\_-\\_aspects\\_of\\_resilient\\_resource\\_strategies\\_Lokale\\_Verfugbarkeit\\_von\\_Rohstoffen\\_bei\\_steigender\\_globaler\\_Nachfrage\\_-\\_Aspekte\\_zu\\_resilient](https://www.researchgate.net/publication/349829218_Local_availability_of_raw_materials_and_increasing_global_demand_-_aspects_of_resilient_resource_strategies_Lokale_Verfugbarkeit_von_Rohstoffen_bei_steigender_globaler_Nachfrage_-_Aspekte_zu_resilient). abgerufen.
- Hilgers, C., Kolb, J. und Becker, I. (2021). Bergbau Verhüttung Recycling. *Ist die deutsche Ressourcenstrategie resilient?*, 76 S. THINKTANK für Industrielle Ressourcenstrategien. Von [https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2021/05/RZ\\_THINKTANK\\_Broschuere\\_Bergbau\\_Verhuettung\\_Recycling\\_DE\\_Web\\_Einzelseiten\\_NEU.pdf](https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2021/05/RZ_THINKTANK_Broschuere_Bergbau_Verhuettung_Recycling_DE_Web_Einzelseiten_NEU.pdf). abgerufen.
- Horng, P. und Kalis, M. (2020). Rechtswissenschaftliche und rechtspolitische Kurzstudie. *Wasserstoff – Farbenlehre*, 25 S. IKEM – Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e. V. Abgerufen am 28. Dezember 2022 von [https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2021/01/IKEM\\_Kurzstudie\\_Wasserstoff\\_Farbenlehre.pdf](https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2021/01/IKEM_Kurzstudie_Wasserstoff_Farbenlehre.pdf).
- Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T., Laing, T. und Drexhage, J. (2020). *Minerals for Climate Action – The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*. World Bank Group. Abgerufen am

16. Oktober 2020 von <https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition>.
- Husarek, D., Schmutge, J. und Niessen, S. (2021). Hydrogen supply chain scenarios for the decarbonisation of a German multi-modal energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, S. 38008 - 38025. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.09.041.
- IEA – International Energy Agency. (2017). *Energy Technology Perspective 2017*, 441 S. OECD/IEA. Abgerufen am 16. September 2022 von <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>.
- IEA – International Energy Agency. (2018). *Global EV Outlook 2018. Towards cross-modal electrification*, 139 S. OECD/IEA. Abgerufen am 15. August 2022 von [https://iea.blob.core.windows.net/assets/387e4191-acab-4665-9742-073499e3fa9d/Global\\_EV\\_Outlook\\_2018.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/387e4191-acab-4665-9742-073499e3fa9d/Global_EV_Outlook_2018.pdf).
- IEA – International Energy Agency. (2020). Germany 2020 – Energy Policy Review. 229 S. Abgerufen am 28. Januar 2020 von [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/G/germany-2020-energy-policy-review.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/G/germany-2020-energy-policy-review.pdf?__blob=publicationFile&v=4).
- IEA – International Energy Agency. (2021). *Global EV Outlook 2021. Accelerating ambitions despite the pandemic*, 101 S. OECD/IEA. Abgerufen am 05. August 2022 von <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>.
- IEA – International Energy Agency. (2021a). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. World Energy Outlook Special Report. Revised Version, March 2022*, 287 S. IEA. Abgerufen am 10. August 2022 von <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- IEA – International Energy Agency. (2021b). *World Energy Model. Part of World Energy Outlook*. IEA. Abgerufen am 23. August 2022 von [https://iea.blob.core.windows.net/assets/932ea201-0972-4231-8d81-356300e9fc43/WEM\\_Documentation\\_WEO2021.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/932ea201-0972-4231-8d81-356300e9fc43/WEM_Documentation_WEO2021.pdf).
- IEA – International Energy Agency. (2022). *Global EV Outlook 2022 – Securing supplies for an electric future*, 221 S. IEA. Abgerufen am 18. Oktober 2022 von <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>.
- IEA. (2022a). *Global Hydrogen Review 2022*, 284 S. International Energy Agency. Abgerufen am 19. Dezember 2022 von <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>.
- Infinity Lithium. (2021). *Integrated Underground Scoping Study San José Lithium Project (14. Oktober 2021)*, 29 S. Abgerufen am 04. November 2021 von <https://company-announcements.afr.com/asx/inf/16796ffa-2c6c-11ec-b1a3-762435244423.pdf>.

- Infinity Lithium. (2022). *Infinity Corporate Presentation "the meet up luncheon" event (18. March 2022)*, 26 S. Abgerufen am 07. Juli 2022 von <https://wcsecure.weblink.com.au/pdf/INF/02500521.pdf>.
- Infinity Lithium. (2022a). *Infinity & LG Energy Solution extend offtake MoU. Pressemitteilung vom 22. Juni 2022*. Abgerufen am 18. Juli 2022 von <https://wcsecure.weblink.com.au/pdf/INF/02533964.pdf>.
- INM Leibniz. (2020). *Grubenwasser als Wertwasser – Bergbau trifft Elektromobilität. Pressemitteilung vom 23. November 2020*. Abgerufen am 02. März 2021 von <https://www.leibniz-inm.de/pressemitteilung/grubenwasser-als-wertwasser-bergbau-trifft-elektromobilitaet/>.
- Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR). (2022). *Windbranche.de*. Abgerufen am 03. November 2022 von <https://www.windbranche.de/windenergie-ausbau/deutschland>.
- Inverto. (2020). *Inverto Rohstoffstudie 2020 in Kooperation mit dem Handelsblatt. Rohstoffmanagement in Zeiten von COVID-19*, 19 S. Abgerufen am 12. Oktober 2020 von <https://www.inverto.com/de/publikationen/rohstoffstudie-2020/>.
- Inverto. (2021). *Ergebnisse der Rohstoffstudie 2021*. Abgerufen am 04. Januar 2022 von <https://www.inverto.com/de/publikationen/ergebnisse-der-rohstoffstudie-2021/>.
- Inverto. (2021a). *Rohstoffstudie 2021. Ergebnisse der Umfrage von INVERTO in Kooperation mit dem Handelsblatt*. 34 S. Abgerufen am 05. Januar 2022 von <https://www.inverto.com/de/publikationen/ergebnisse-der-rohstoffstudie-2021/>.
- Iooss, B. und Saltelli, A. (2017). Introduction to Sensitivity Analysis. In R. Ghanem, H. Owhadi und D. Higdon, *Handbook of Uncertainty Quantification* (S. 1103 - 1122). doi:10.1007/978-3-319-12385-1\_31.
- IRENA. (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 °C Climate Goal*, 106 S. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRP. (2020). A report of the International Resource Panel. *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future*. Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S., Heeren, N., 179 S. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme.
- ISTE. (2021). *Der Geokoffer*. Industrieverband Steine und Erden. Abgerufen am 13. Mai 2021 von <https://www.iste.de/steine-und-erden-erleben/geokoffer/>.
- ITG Informationsportal Tiefengeothermie. (2022). *Bruchsal*. Abgerufen am 02. November 2022 von <https://www.tiefengeothermie.de/projekte/bruchsal>.
- Ito, A., Langefeld, B. und Götz, N. (2020). *The future of steelmaking – How the European steel industry can achieve carbon neutrality*. München: Roland Berger. Abgerufen am 25.

- Februar 2021 von <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Europe%27s-steel-industry-at-a-crossroads.html>.
- JORC. (2012). *Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code)*, 44 S. Aus IMM – The Minerals Institute. Abgerufen am 08. August 2022 von [https://www.jorc.org/docs/JORC\\_code\\_2012.pdf](https://www.jorc.org/docs/JORC_code_2012.pdf).
- K&S. (2014). Antrag auf Planfeststellung Hartsalzwerk Siegfried-Giesen. *Planfeststellungsunterlage zum Rahmenbetriebsplan. Unterlage A Allgemein verständliche Zusammenfassung*, 67 S. K+S Aktiengesellschaft. Abgerufen am 07. Dezember 2021 von <https://nibis.lbeg.de/LBEGVeroeffentlichungen/Planfeststellungsverfahren/SG/A/A%20AVZ%20Text.pdf>.
- Kaiser, R. (2014). *Qualitative Experteninterviews. Konzeptionelle Grundlagen und praktische Durchführung* (1. Ausg.). Wiesbaden: Springer VS. doi:10.1007/978-3-658-02479-6.
- Karabelli, D., Oberle, M. (2022). Chapter 1: Overview of the Battery Manufacturing Process. In: *Handbook on Smart Battery Cell Manufacturing*, S. 3 - 31. doi: 10.1142/9789811245626\_0002.
- Keliber. (2021). *Mineral resources and ore reserves*. Abgerufen am 08. August 2021 von <https://www.keliber.fi/en/geology/mineral-resources-and-ore-reserves/>.
- Keliber. (2022). *Progress Report Q1*, 23 S. Abgerufen am 04. Juli 2022 von [https://www.keliber.fi/site/assets/files/2678/keliber\\_progress\\_report\\_january-march\\_2022-1.pdf](https://www.keliber.fi/site/assets/files/2678/keliber_progress_report_january-march_2022-1.pdf).
- Kelly, J. C., Wang, M., Dai, Q., Winjobi, O. (2021). Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries. *Resources, Conservation & Recycling*, 174. doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105762.
- Kiemel, S., Smolinka, T., Lehner, F., Full, J., Sauer, A. und Mieke, R. (2021). Critical materials for water electrolyzers at the example of the energy transition in Germany. *Int. J. of Energy Research*, S. 1 - 22. doi:10.1002/er.6487.
- Kluge, C. (2021). Batterienhersteller Microvast in Ludwigsfelde: Volle Ladung für Elektromobilität aus Brandenburg. *Tagesspiegel online vom 12. Februar 2021*. Abgerufen am 08. Juni 2022 von <https://www.tagesspiegel.de/berlin/volle-ladung-fur-elektromobilitat-aus-brandenburg-5389213.html>.
- Kosow, H. und Gaßner, R. (2008). *Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse. Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien, Werkstattbericht Nr. 103*, 88 S. IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. Abgerufen am 24. August 2022 von [https://www.izt.de/fileadmin/publikationen/IZT\\_WB103.pdf](https://www.izt.de/fileadmin/publikationen/IZT_WB103.pdf).

- Kreibe, S., Berkmüller, R., Förster, A., Peche, R., Reinelt, B., Krupp, M., Röder, S., Schleifenbaum, M. (2019). Abschlussbericht. *ILES A – Edel- und sondermetallhaltige Abfallströme intelligent lenken: Bündelung, Zwischenlagerung, Rückgewinnungsgrad.*, 405 S. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Abgerufen am 27. Januar 2021 von <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ilesa-edel-sondermetallhaltige-abfallstroeme>.
- Kresse, C., Bastian, D., Bookhagen, B. und Frenzel, M. (2022). Commodity Top News Nr. 67. *Lithium-Ionen-Batterierecycling in Deutschland und Europa*, 13 S. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Von [https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity\\_Top\\_News/Rohstoffwirtschaft/67\\_Lithium-Ionen-Batterierecycling.html?nn=1542330](https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/67_Lithium-Ionen-Batterierecycling.html?nn=1542330) abgerufen.
- KSG. (2019). Bundes-Klimaschutzgesetz (12. Dezember 2019). Abgerufen am 22. Dezember 2020 von <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>.
- KSG. (2021). Bundes-Klimaschutzgesetz (18. August 2021). Abgerufen am 09. November 2022 von <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>.
- Kühne, O., Berr, K. und Jenal, C. (2020). Die Gewinnung mineralischer Rohstoffe als konfliktärer Landschaftsprozess. In R. Duttmann, O. Kühne und F. Weber, *Landschaft als Prozess. RaumFragen: Stadt – Region – Landschaft* (S. 585 - 601). Wiesbaden: Springer VS. doi:10.1007/978-3-658-30934-3\_28.
- Kullik, J. (2020). Auslandsinformationen online. *Verlorenes Jahrzehnt der Rohstoffpolitik. Die ungelöste Abhängigkeit des Westens von Seltenen Erden und anderen kritischen Hightech-Metallen*, 24. Konrad Adenauer Stiftung. Abgerufen am 23. November 2020 von <https://www.kas.de/documents/259121/8116012/Verlorenes+Jahrzehnt+der+Rohstoffsicrheit.pdf/c464815f-4da1-ad73-368d-95e480bd63f9?version=1.0&t=1602149909435>.
- Kumar, A., Fukuda, H., Hatton, T. und Lienhard, J. (2019). Lithium Recovery from Oil and Gas Produced Water: A Need for a Growing Energy Industry. *ACS Energy Letters*, 4 (6), S. 1471–1474. doi:10.1021/acsenergylett.9b00779.
- Kushnir, D. und Sandén, B. A. (2012). The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles. *Resources Policy*, 37 (1), 93 - 103. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.11.003>.
- Land Brandenburg. (2022). *Häufig gestellte Fragen zur Tesla-Ansiedlung*. Abgerufen am 29. Juni 2022 von <https://www.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.658136.de>.
- LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen. (2020). *Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik 2019*, 70 S. Hannover: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen.
- Lee, K. und Cha, J. (2020). Towards Improved Circular Economy and Resource Security in South Korea. *Sustainability*, 13 (17). doi:10.3390/su13010017.

- Lee, T. D. (1984). Planning and mine feasibility study – An owner’s perspective. In: Proceedings of the 1984 NWMA Short Course “Mine Feasibility – Concept to Completion.”. S. 43 - 101. Spokane, WA: Northwest Mining Association.
- Li, J., Du, Z., Ruther, R. E., An, S. J., David, L. A., Hays, K., Wood, M., Philip, N. D., Sheng, Y., Mao, C., Kalanus, S., Daniel, C., Wood, D. (2017). Toward Low-Cost, High-Energy Density, and High-Power Density Lithium-Ion Batteries. *JOM*, 69 (9), 1484 - 1496. doi:10.1007/s11837-017-2404-9.
- Li, Z., Li, C., Liu, X., Li, C., Li, P., Wei, R., Li, X., Guo, D., huang, K.-W. and Lai, Z. (2021). Continuous electrical pumping membrane process for seawater lithium mining. *Energy Environ. Sci.*, 14, S. 3152 - 3159. doi:10.1039/D1EE00354B.
- Liedtke, M. und Huy, D. (2018). DERA Rohstoffinformationen 35. *Rohstoffrisikobewertung Gallium*, 86 S. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur (DERA).
- Limbers, J., Böhmer, M. und Hoch, M. (2016). *Volkswirtschaftliche Folgen einer Schwächung der Stahlindustrie Deutschland*, 39 S. Freiburg: Prognos. Abgerufen am 18. Dezember 2020 von Volkswirtschaftliche Folgen einer Schwächung der Stahlindustrie Deutschland.
- Liu, C., Li, Y., Lin, D., Hsu, P.-C., Liu, B., Yan, G., Wu, T. and Chu, S. (2020). Lithium Extraction from Seawater through Pulsed Electrochemical Intercalation. *Joule*, 4 (7), S. 1459 - 1469. doi:10.1016/j.joule.2020.05.017.
- Livent. (2018). Lithium Hydroxide Monohydrate, Battery Grade. Data Sheet. Abgerufen am 21. Oktober 2022 von <https://livent.com/wp-content/uploads/2018/09/QS-PDS-1021-r3.pdf>.
- Livent. (2022). Lithium Carbonate, Battery Grade. Data Sheet. Abgerufen am 21. Oktober 2022 von <https://livent.com/wp-content/uploads/2022/09/QS-PDS-1059-r4-Lithium-Carbonate-Battery-Grade-Product-Website.pdf>.
- Lucks, T. und Bowell, R. (2021). *Preliminary Economic Assessment of Norra Kärr Rare Earth Deposit and Potential Byproducts, Sweden*. Cardiff: srk consulting. Retrieved Januar 26, 2023, from [https://leadingedgematerials.com/wp-content/uploads/2021/08/NorraKarr\\_PEA\\_43-101.pdf](https://leadingedgematerials.com/wp-content/uploads/2021/08/NorraKarr_PEA_43-101.pdf).
- Lüders, V., Plessen, B., Romer, R., Weise, S., Banks, D., Hoth, P., Dulski, P. and Schettler, G. (2010). Chemistry and isotopic composition of Rotliegend and Upper Carboniferous formation waters from the North German Basin. *Chemical Geology*, 276, 198 - 208.
- Mackenzie, W. und Cusworth, N. (2007). The Use and Abuse of Feasibility Studies. *Project Evaluation Conference (19. - 20. Juni 2007)*, S. 65 - 76. Abgerufen am 18. Oktober 2022 von <https://enthalpy.com.au/wp-content/uploads/2013/09/The-Use-and-Abuse-of-Feasibility-Studies-Enthalpy.pdf>.

- Maihold, G. und Mühlhofer, F. (2021). Instabile Lieferketten gefährden die Versorgungssicherheit. Handlungsoptionen für Unternehmen und Politik. *SWP-Aktuell*, A80, 8 S. doi:10.18449/2021A80.
- Malin, L., Jansen, A., Seyda, S. und Flake, R. (2019). KOFA-Studie 2/2019 Fachkräfteengpässe in Unternehmen. *Fachkräftesicherung in Deutschland – diese Potenziale gibt es noch*, 28 S. Institut der deutschen Wirtschaft Köln e. V. Abgerufen am 03. Januar 2022 von [https://www.kofa.de/media/Publikationen/Studien/Fachkraefteengpaesse\\_2019\\_2.pdf](https://www.kofa.de/media/Publikationen/Studien/Fachkraefteengpaesse_2019_2.pdf).
- Malterud, G., Siersma, V.-D. und Guassora, A.-D. (2016). Sample Size in Qualitative Interview Studies: Guided by Information Power. *Qualitative Health Research*, 26 (13), S. 1753 - 1760. doi:10.1177/1049732315617444.
- Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Baur, S.-J., Billaud, M., Deubzer, O., Eberling, Erdmann, L., Haendel, M., Krail, M., Loibl, A., Neef, C., Neuwirtz, M., Rostek, L., Shirinzadeh, S., Stijpeic, D., Espinoza, L.T., Baur, S.-J., Billaud, M., Deubzner, O., Maisel, F., Marwede, M., Rückschloss, J. und Tippner, M. (2021). *Rohstoffe für Zukunftstechnologien*, 366 S. Berlin: DERA Rohstoffinformationen 50. Abgerufen am 01. Juli 2021 von [https://www.deutscherohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf;jsessionid=1FB721F0EF156157B131AA630B1A9A10.2\\_cid292?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.deutscherohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf;jsessionid=1FB721F0EF156157B131AA630B1A9A10.2_cid292?__blob=publicationFile&v=4).
- Mason, M. (2010). Sample Size and Saturation in PhD Studies Using Qualitative Interviews. *Forum Qualitative Social Research*, 11 (3, Art. 8). doi:10.17169/fqs-11.3.1428 .
- Mayring, P. (2019). Qualitative content analysis: Demarcation, varieties, developments. *Forum Qualitative Social Research*, 20 (3, Art. 16), 14 S.
- Mayring, P. und Fenzl, T. (2019). Qualitative Inhaltsanalyse. In: N. Baur und J. Blasius, *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Wiesbaden: Springer VS. doi:10.1007/978-3-531-18939-0\_38.
- Mayya, A., Steward, D., Mann, M. (2018). The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive li-ion batteries. *Sustainable Materials and Technologies*, 17. doi: 10.1016/j.susmat.2018.e00087.
- McEachern, P. (2017). *MGX Minerals Provides Additional Details on Lithium Extraction from Oilfield Wastewater and the Future of Petrolithium. Report vom 18. Januar 2017*. Vancouver: MGX Minerals. Abgerufen am 02. März 2021 von <https://webfiles.thecse.com/PR-18-2017.pdf>.
- Meier, P. (2021). Keine Geothermie in Renchen: Gemeinderat erteilt Vulcan Energy Resources eine Absage. *BNN – Badische Neuste Nachrichten online vom 20. Oktober 2021*. Abgerufen am

03. November 2021 von <https://bnn.de/mittelbaden/ortenau/renchen/gemeinderat-renchen-erteilt-vulcan-energy-resources-absage>.
- Mertineit, M. und Schramm, M. (2019). Lithium Occurrences in Brines from Two German Salt Deposits (Upper Permian) and First Results of Leaching Experiments. *MDPI Minerals*, 9 (12), 766. doi:<https://doi.org/10.3390/min9120766>.
- Meshram, P., Pandey, B. D. und Mankhand, T. R. (2014). Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review. *Hydrometallurgy*, 150, S. 192 - 208.
- Metalary. (2022). *Lithium Price*. Abgerufen am 02. September 2022 von <https://www.metalary.com/lithium-price/>.
- METI. (2020). Energy and Environment Policy. *New International Resource Strategy Formulated. Pressemitteilung vom 30. März 2020*. Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan. Abgerufen am 18. Januar 2022 von [https://www.meti.go.jp/english/press/2020/0330\\_005.html](https://www.meti.go.jp/english/press/2020/0330_005.html).
- Michaelis, S., Rahimzei, E., Kampker, A., Heimes, H., Offermanns, C., Locke, M., et al. (2020). *Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030*, 153 S. Frankfurt am Main: VDMA. Von [https://www.vdma.org/c/document\\_library/get\\_file?uuid=6037f526-9679-43a2-35a1-513090abd700&groupId=34570](https://www.vdma.org/c/document_library/get_file?uuid=6037f526-9679-43a2-35a1-513090abd700&groupId=34570). abgerufen.
- Minke, C., Suermann, M., Bensmann, B. und Hanke-Rauschenbach, R. (2021). Is iridium demand a potential bottleneck in the realization of large-scale PEM water electrolysis? *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, S. 23581 - 23590. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.04.174.
- Moos, M. (2021). Achern sagt kategorisch Nein zur Lithium-Erkundung. *BNN – Badische Neuste Nachrichten vom 15. September 2021, Nr. 214*, S. 33.
- Munk, L. A., Bradley, S. A., Boutt, D., Labay, K. und Jochens, H. (2016). Lithium Brines: A global perspective. *Rev. Econ. Geol.*, 18, S. 339 - 365.
- Neff, J., Lee, K. und DeBlois, E. (2011). Produced Water: Overview of Composition, Fates and Effects. In K. Lee und J. Neff, *Produced Water, Environmental Risks and Advances in Mitigation Technologies* (S. 3 - 54). New York: Springer. doi:10.1007/978-1-4614-0046-2\_1.
- Netzwerk Yes to Life, No to Mining. (2020). *Carta en apoyo "Salvemos la Montaña" de Cáceres / Letter in support of the Platform "Salvemos la Montaña de Cáceres"*. Abgerufen am 08. November 2021 von <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdgU7DO-ltBwzqJsuyNIPAWaGloQCI77J9bmLCWaVgKFbiP5g/viewform>.
- Neumann, J., Petranikova, M., Meeus, M., Gamarra, J. D., Younesi, R., Winter, M. und Nowak, S. (2022). Recycling of Lithium-Ion Batteries – Current State of the Art, Circular Economy,

- and Next Generation Recycling. *Advanced Energy Materials*, 12, 26 S. doi:10.1002/aenm.202102917.
- Neuwirth, M., Fleiter, T., Manz, P., Hofmann, R. (2022). The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries – a site-specific approach applied to Germany. *Energy, Conversion and Management*, 252, 19 S. doi: 10.1016/j.enconman.2021.115052.
- Niemeyer, K. (2023). Saerbecker Wasserstoffunternehmen: Enapter entlässt zehn Prozent der Belegschaft. *Münstersche Zeitung online Ausgabe vom 29.01.2023*. Abgerufen am 31. Januar 2023 von <https://www.muensterschezeitung.de/lokales/staedte/saerbeck/wasserstoffunternehmen-enapter-entlasst-zehn-prozent-belegschaft-2697488?pid=true>.
- Nippa, M. (2015). *Perspektiven der Kohlenutzung in Deutschland – 2014. Meinungsvielfalt trotz Polarisierung*, 48 S. Deutsche EnergieRohstoff-Zentrum. Abgerufen am 09. Dezember 2021 von [https://www.vbgu.de/fileadmin/downloads/AkzeptanzstudieIIIkomplett\\_13.03.2015.pdf](https://www.vbgu.de/fileadmin/downloads/AkzeptanzstudieIIIkomplett_13.03.2015.pdf).
- Northvolt. (2022). *Northvolt in 2022: where we stand (part 1)*. Abgerufen am 21. Juli 2022 von <https://northvolt.com/articles/northvolt-2022-where-we-stand/>.
- NPM – Neo Performance Materials. (2022). *Hudson Resources And Neo Performance Materials Sign Agreement On The Sarfartoq Rare Earth Element Project In Greenland. Pressemitteilung vom 22. August 2022*. Abgerufen am 12. März 2023 von <https://www.neomaterials.com/hudson-resources-and-neo-performance-agreement/>.
- Obermaier, T. (2014). *Fachkräftemangel*. Bundeszentrale für politische Bildung. Abgerufen am 03. Januar 2022 von <https://www.bpb.de/themen/arbeit/arbeitsmarktpolitik/178757/fachkraeftemangel/>.
- Odrich, P. (2022). *Nickelpreis völlig außer Kontrolle – Handel unterbrochen. Mitteilung vom 11. März 2022*. VDI Nachrichten. Abgerufen am 15. März 2022 von <https://www.vdi-nachrichten.com/wirtschaft/rohstoffe/nickelpreis-voellig-ausser-kontrolle-handel-unterbrochen/>.
- OECD. (2018). in OECD Business and Finance Outlook 2018. *China's Belt and Road Initiative in the Global Trade, Investment and Finance Landscape*, 46 S. Paris: OECD Publishing. doi:10.1787/bus\_fin\_out-2018-6-en.
- OECD. (2019). *Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences*, 214 S. Paris: OECD Publishing. Abgerufen am 03. September 2022 von <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
- Öko-Institut. (2017). *Strategien für die nachhaltige Rohstoffversorgung der Elektromobilität. Synthesepapier zum Rohstoffbedarf für Batterien und Brennstoffzellen. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende*, 80 S. Darmstadt.

- Olivetti, E. A., Ceder, G., Gaustad, G. und Fu, X. (2017). Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals. *Joule*, 1(2), S. 225 - 228. Abgerufen am 15. Mai 2022 von <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.08.019>.
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environment Change*, 42, S. 169 - 180. Von <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>. abgerufen.
- Peerawattuk, I. und Bobicki, E. R. (2018). Lithium Extraction and Utilization: A Historical Perspective. In B. Davis, et al., *The Minerals, Metals & Materials Series* (S. 2209 - 2224). Springer. Von [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8\\_186](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8_186). abgerufen
- Petrascheck, W. und Pohl, W. (1982). *Lagerstättenlehre: Eine Einführung in die Wissenschaft von den mineralischen Bodenschätzen*. Stuttgart: Schweierbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Produced Water Society. (2021). *MGX Minerals and Eureka Resources join forces in lithium recovery venture. Mitteilung vom 09. Juli 2021*. Abgerufen am 02. März 2022 von <https://producedwatersociety.com/mgx-minerals-and-eureka-resources-join-forces-in-lithium-recovery-venture/>.
- Prognos und Sphera. (2022). *Analyse der aktuellen Situation des H2-Bedarfs und Erzeugungspotenzials in Baden-Württemberg*, 114 S. Stuttgart: e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg. Abgerufen am 10. Mai 2022 von [https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW\\_Wasserstoffbedarf\\_und\\_Erzeugungspotenzial.pdf](https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW_Wasserstoffbedarf_und_Erzeugungspotenzial.pdf).
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut. (2021). *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende*. Abgerufen am 20. Oktober 2022 von <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>.
- PwC. (2018). *Fachkräftemangel im öffentlichen Dienst. Prognose und Handlungsstrategien bis 2030*, 93 S. Abgerufen am 09. Dezember 2021 von <https://www.daserste.de/information/wirtschaft-boerse/plusminus/sendung/studie-pwc-oeffentlicher-dienst-100.pdf>.
- PwC. (2021). *Digitalisierung, Nachhaltigkeit und Corona in der Bauindustrie. Eine PwC-Studie zum Umgang der Branche mit den drei aktuellen Herausforderungen*, 11 S. Abgerufen am 09. Dezember 2021 von <https://www.pwc.de/de/digitale-transformation/pwc-studie-digitalisierung-nachhaltigkeit-und-corona-in-der-bauindustrie.pdf>.

- RAG Stiftung. (2020). *Grubenwasser als Wertwasser – Bergbau trifft Elektromobilität. Pressemitteilung vom 23. November 2020*. Abgerufen am 02. März 2021 von <https://www.rag-stiftung.de/presse/pressemitteilungen/grubenwasser-als-wertwasser-bergbau-trifft-elektromobilitaet>.
- Rat der EU. (2022). *Paket „Fit für 55“: Allgemeine Ausrichtungen des Rates zu Emissionsreduktionen und ihren sozialen Auswirkungen. Pressemitteilung vom 29. Juni 2022*. Abgerufen am 04. August 2022 von <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2022/06/29/fit-for-55-council-reaches-general-approaches-relating-to-emissions-reductions-and-removals-and-their-social-impacts/>.
- Rat der Europäischen Union. (2022). Beschluss (GASP) 2022/2078 des Rates vom 16. Dezember 2022. *Zur Änderung des Beschlusses 2014/512/GASP über restriktive Maßnahmen angesichts der Handlungen Russlands, die die Lage in der Ukraine destabilisieren*. Brüssel: Amtsblatt der Europäischen Union. Abgerufen am 12. März 2023 von <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2022:322I:FULL&from=EN>.
- Reuter, M. (2018). Von der Utopie einer Kreislaufwirtschaft. In: O. Jorzik, J. Kandarr und P. Klinghammer, *ESKP-Themenspezial Rohstoffe in der Tiefsee. Metalle aus dem Meer für unsere High-Tech-Gesellschaft* (S. 92 - 97). Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. doi:10.2312/eskp.2018.2.4.10.
- Reuter, M.A., Kojo, I.V. (2012). Challenges of Metal Recycling. *Materia 2*, S. 50–56.
- Reuter, M., van Schaik, A., Gutzmer, J., Bartie, N. und Abadías-Llamas, A. (2019). Challenges of the circular economy: a material, metallurgical and product design perspective. *Annual Review of Material Research*, 49, S. 253 - 274. doi:10.1146/annurev-matsci-070218-010057.
- Reuters. (2021). Handelsblatt online vom 30. September 2021. *Kohle-Engpässe setzen Chinas Wirtschaft unter Druck – Bürger fürchten Heizprobleme*. Abgerufen am 23. Dezember 2021 von <https://www.handelsblatt.com/politik/international/energie-kohle-engpaesse-setzen-chinas-wirtschaft-unter-druck-buerger-fuerchten-heizprobleme/27664450.html?ticket=ST-6020511-YybFQbBYIdalFaRjNWLX-cas01.example.org>.
- Reva, M., Chomko, D. und Chomko, F. (2021). Prospects lithium extraction from produced water in oil and gas fields of Ukrainian. *Geoinformatics*, 2021, 1 - 7. doi:/10.3997/2214-4609.20215521150.
- Riedl, L., Materne, T., Hage, G. und Jacoby, C. (2021). Planungsbeschleunigung. *Zeitliche Optimierungsmöglichkeiten der Aufstellung/Teilfortschreibung von Regionalplänen., MORO Informationen 20/1*. BMI – Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat. Abgerufen am 30. März 2022 von <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/moro-info/20/moroinfo-20.html>.

- Rio Tinto. (2020). *Rio Tinto declares maiden Ore Reserve at Jadar*. Abgerufen am 03. November 2021 von <https://www.riotinto.com/-/media/Content/Documents/Invest/Reserves-and-resources/RT-Jadar-Reserves-2020.pdf?rev=c31b0fd7047f46dcba39bc3dea49ccb6>.
- Rio Tinto. (2022). *Jadar Project Update*. Abgerufen am 08. März 2022 von <https://www.riotinto.com/operations/projects/jadar>.
- RL 92/43/EWG des Rates. (2013). Richtlinie (13. Mai 2013). *Zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen*. Amtsblatt der Europäischen Union.
- Robinius, M., Markewitz, P., Lopion, P., Kullmann, F., Heuser, P.-M., Syranidis, K., Cerniauskas, S., Schöb, T., Reuß, M., Ryberg, S., Kotzur, L., Caglayan, D., Welder, L., Linßen, J., Grube, T., Heinrichs, H., Stenzel, P., Stolten, D. (2020). *Wege für die Energiewende. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050*. 161 S. Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3).
- Rock Tech Lithium. (2022). *Rock Tech Lithium startet Genehmigungsverfahren für Europas ersten Lithiumhydroxid-Konverter*. Pressemitteilung vom 22. Februar 2022. Abgerufen am 15. August 2022 von [https://res.cloudinary.com/rocktech/image/upload/v1645531336/PM\\_Genehmigungsverfahren\\_Rock\\_Tech\\_82f6ace1aa.pdf](https://res.cloudinary.com/rocktech/image/upload/v1645531336/PM_Genehmigungsverfahren_Rock_Tech_82f6ace1aa.pdf).
- Rohde, R. (2021). *Logistikkette in China bleibt störanfällig*. Germany Trade and Invest. Abgerufen am 23. Dezember 2021 von <https://www.gtai.de/de/trade/china/branchen/logistikkette-in-china-bleibt-stoeranfaellig-666042>.
- Roland Berger. (2022). *The Lithium-Ion (EV) battery market and supply chain. Market drivers and emerging supply chain risks*. Abgerufen am 03. August 2022 von [https://content.rolandberger.com/hubfs/07\\_presse/Roland%20Berger\\_The%20Lithium-Ion%20Battery%20Market%20and%20Supply%20Chain\\_2022\\_final.pdf](https://content.rolandberger.com/hubfs/07_presse/Roland%20Berger_The%20Lithium-Ion%20Battery%20Market%20and%20Supply%20Chain_2022_final.pdf).
- Sanz, J., Tomasa, O., Jimenez-Franco, A. und Sidki-Rius, N. (2022). Iridium (Ir) [Z=77]. In: *Elements and Mineral Resources. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment* (S. 111 - 114). Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-85889-6\_27.
- Sanz, J., Tomasa, O., Jimenez-Franco, A. und Sidki-Rius, N. (2022a). Scandium (Sc) [Z=21]. In: *Elements and Mineral Resources. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment* (S. 311 - 313). Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-85889-6\_78.
- Sanz, J., Tomasa, O., Jimenez-Franco, A. und Sidki-Rius, N. (2022b). Dysprosium (Dy) [Z = 66]. In: *Elements and Mineral Resources. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment* (S. 269–271). Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-85889-6\_67.

- Sanz, J., Tomasa, O., Jimenez-Franco, A. und Sidki-Rius, N. (2022c). Praseodymium (Pr) [Z = 59]. In: *Elements and Mineral Resources. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment* (S. 301–303). Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-85889-6\_75.
- Sanz, J., Tomasa, O., Jimenez-Franco, A. und Sidki-Rius, N. (2022d). Neodymium (Nd) [Z = 60]. In: *Elements and Mineral Resources. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment* (S. 297–300). Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-85889-6\_74.
- S&P Global. (2021). *European Metals' Cinovec project to produce low carbon lithium*. Abgerufen am 08. März 2022 von <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/metals/112321-european-metals-cinovec-project-to-produce-low-carbon-lithium>.
- Salzgitter AG. (2022). Projekt WindH2. *Windwasserstoff Salzgitter – das Projekt*. Salzgitter AG. Abgerufen am 28. Dezember 2022 von <https://salcos.salzgitter-ag.com/de/windh2.html>.
- Sandelowski, M. (1995). Sample size in qualitative research. *Res Nurs Health*, 18 (2), 179–183. doi:10.1002/nur.4770180211.
- Sanjuan, B., Millot, R., Innocent, C., Dezayes, C., Scheiber, J. und Brach, M. (2016). Major geochemical characteristics of geothermal brines from the Upper Rhine Graben granitic basement with constraints on temperature and circulation. *Chemical Geology*, 428, S. 27 - 47.
- Savannah Resources Plc. (2018). *Scoping Study for the Mina do Barroso Lithium Project Delivers NPV of US\$356m Solid Basis to Fast Track the Project to a Feasibility Study. Pressemitteilung vom 14. Juni 2018*. Abgerufen am 03. November 2021 von <https://www.savannahresources.com/investors/rns-feed/rns-announcements/?rid=4019283>.
- Savannah Resources Plc. (2021). Corporate Presentation, September 2021. *Europe's leading conventional lithium project*, 29 S. Abgerufen am 03. November 2021 von <https://www.savannahresources.com/media/hhffipfp/savannah-corporate-presentation-september-2021.pdf>.
- Savannah Resources. (2021a). *Heads of Agreement between Savannah and Galp re. strategic investment & offtake agreement. Pressemitteilung vom 12. Januar 2021*. Abgerufen am 18. Juli 2022 von <https://www.savannahresources.com/investors/rns-feed/rns-announcements/?rid=4019399>.
- Savannah Resources Plc. (2022). *Enabling Europe's Energy Transition. AGM Presentation 08. Juni 2022. Europe's Leading Conventional Lithium Project*. Abgerufen am 01. Juli 2022 von <https://www.savannahresources.com/media/nasaoof0/savannah-corporate-agm-presentation.pdf>.
- Schäfer, J. und Schmidt, M. (2020). Discrete-Point Analysis of the Energy Demand of Primary versus Secondary Metal Production. *Environmental Science and Technology*, S. 507 - 516. doi:10.1021/acs.est.9b05101.

- Schmid, M. (2020). *Unternehmerische Rohstoffstrategien. Zum Umgang mit kritischen Versorgungssituationen*. Wiesbaden: Springer Gabler. doi:10.1007/978-3-658-29007-8.
- Schmidt, M. (2015). *Rohstoffrisikobewertung – Platingruppenmetalle*, 160 S. Berlin: DERA Rohstoffinformationen 26.
- Schmidt, M. (2017). *Rohstoffrisikobewertung – Lithium*, 140 S. Berlin: 33. DERA Rohstoffinformationen.
- Schmidt, M. (2022). *Rohstoffrisikobewertung – Lithium 2030, Update*, 29 S. Berlin: DERA - Deutsche Rohstoffagentur. Abgerufen am 15. August 2022 von [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/vortrag-lithium-schmidt-22.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/vortrag-lithium-schmidt-22.pdf?__blob=publicationFile&v=2).
- Schmidt, M., Schäfer, P. und Rötzer, N. (2020). Primär- und Sekundärmetalle und ihre Klimarelevanz. In: Holm et al., *Berliner Recycling- und Sekundärrohstoffkonferenz* (S. 3 - 16). Berlin.
- Schmidt, T. (2020). *Wasserstofftechnik – Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft* (1. Ausg.). München: Carl Hanser Verlag.
- Schüler-Zhou, Y., Felizeter, B. und Ottsen, A.K. (2019). DERA Rohstoffinformationen 41. *Einblicke in die chinesische Rohstoffwirtschaft*, 120 S. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).
- Schuhmacher, K., Schultmann, F. (2017), Local Acceptance of Biogas Plants: A Comparative Study in the Trinational Upper Rhine Region. *Waste Biomass Valor*, 8, S. 2393–2412. doi: 10.1007/s12649-016-9802-z.
- Schuppert, A. (2021). *Globale Lieferketten unter Druck*. BDI. Abgerufen am 23. Dezember 2021 von [https://bdi.eu/artikel/news/globale-lieferketten-unter-druck/?tx\\_news\\_pi1%5Bday%5D=17&tx\\_news\\_pi1%5Bmonth%5D=12&tx\\_news\\_pi1%5Byear%5D=2021&cHash=6af6adab43c4dc36b19e8ee81c27dde5](https://bdi.eu/artikel/news/globale-lieferketten-unter-druck/?tx_news_pi1%5Bday%5D=17&tx_news_pi1%5Bmonth%5D=12&tx_news_pi1%5Byear%5D=2021&cHash=6af6adab43c4dc36b19e8ee81c27dde5).
- Schwarz, H. und Pfeiffer, K. (2018). Erneuerbare müssen mehr Systemdienstleistungen erbringen, konventionelle Stromerzeugung wird noch gebraucht. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 68 (9), S. 32 - 35.
- Schwarz, R. (2012). Deutschlands Rohstoffpartnerschaften. *Welt Trends – Zeitschrift für internationale Politik*, 87, S. 9 - 15.
- Siemens AG. (2019). *Siemens liefert PEM-Elektrolyseur an Salzgitter AG. Pressemitteilung vom 18. November 2019*. Houston: Siemens AG und Salzgitter AG. Abgerufen am 29. September 2021 von <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/siemens-liefert-pem-elektrolyseur-salzgitter-ag>.

- Siemens Energy. (2019). Konferenzbeitrag. *Future Mining Energy Solutions – Hydrogen Hybrid Remote Area Power Systems (RAPS)*. Siemens Australia. Abgerufen am 05. April 2021 von <https://australia.energyandmines.com/files/Case-Study-Opportunities-and-Challenges-of-Integrating-Hydrogen-into-a-Mining-Hybrid-Warner-Priest-Siemens.pdf>.
- Siemens Energy. (2021). Factsheet. *SILYZER 300 – Die nächste Dimension der PEM-Elektrolyse*. Erlangen: Siemens AG. Von <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:abae9c1e48d6d239c06d88e565a25040ed2078dc/version:1524040818/ct-ree-18-047-db-silyzer-300-db-de-en-rz.pdf> abgerufen.
- Siemens Gamesa. (2022). Technisches Datenblatt. *The SG 14-222 DD*. Abgerufen am 28. Dezember 2022 von <https://www.siemensgamesa.com/-/media/siemensgamesa/downloads/en/products-and-services/offshore/brochures/siemens-gamesa-offshore-wind-turbine-brouchure-sg-14-222-dd.pdf>.
- Simon, B., Ziemann, S. und Weil, M. (2015). Potential metal requirement of active materials in lithium-ion battery cells of electric vehicles and its impact on reserves: Focus on Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, S. 300 - 310. Von <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.011> abgerufen.
- Sinn, H. (2017). Buffering volatility: A study on the limits of Germany's energy revolution. *European Economic Review*, 99, S. 130 - 150. doi:10.1016/j.eurocorev.2017.05.007.
- Slunitschek, K. und Reich, R. (2022). Lithium in Europa. *Grundlagen und Extraktionsmethoden*, S. 54 - 58. (K. Steiger, C. Hilgers und J. Kolb, Hrsg.) Karlsruhe: ThinkTank für Industrielle Ressourcenstrategien. Abgerufen am 12. Januar 2023 von [https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2023/01/RZ\\_THINKTANK\\_Broschuere\\_Lithium\\_Europa\\_DE\\_Web.pdf](https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2023/01/RZ_THINKTANK_Broschuere_Lithium_Europa_DE_Web.pdf).
- Smolinka, T., Wiebe, N., Sterchele, P., Palzer, A., Lehner, F., Jansen, M., Kiemel, S., Mieke, R., Wahren, S., Zimmermann, F. (2018). *Studie IndWEDe – Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme*, 201 S. Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW GmbH. Abgerufen am 31. März 2021 von [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/indwede-studie\\_v04.1.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/indwede-studie_v04.1.pdf).
- SMWA. (2017). *Rohstoffstrategie für Sachsen. Rohstoffwirtschaft – eine Chance für den Freistaat Sachsen*, 2, 44 S. Dresden: Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr – Referat 46 (Bergbau und Umweltfragen). Abgerufen am 28. April 2021 von <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/16194>.
- Soltani, M., Kashkooli, F. M., Souri, M., Rafiei, B., Jabarifar, M., Gharali, K. und Nathwani, J. (2021). Environmental, economic and social impacts of geothermal energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 140. Abgerufen am 02. Februar 2022 von <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110750>.

- Speirs, J., Contestabile, M., Houari, Y. und Gross, R. (2014). The future of lithium availability for electric vehicle batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, S. 183 - 193. Abgerufen am 03. August 2022 von <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.018>.
- Steiger, K., Hilgers, C. und Kolb, J. (2022). *Factsheet. Notwendigkeit einer resilienten Rohstoffversorgung Vol. 2. Herausforderungen bei der Rohstoffversorgung für Deutschland – eine holistische Betrachtung durch Experteninterviews*, 18 S. Karlsruhe: THINKTANK für Industrielle Ressourcenstrategien. Von [https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2022/05/RZ\\_THINKTANK\\_Factsheet\\_Notwendigkeit-einer-resilienten-Rohstoffversorgung-\\_A4\\_DE\\_web.pdf](https://www.thinktank-irs.de/wp-content/uploads/2022/05/RZ_THINKTANK_Factsheet_Notwendigkeit-einer-resilienten-Rohstoffversorgung-_A4_DE_web.pdf) abgerufen.
- Steiger, K., Hilgers, C. und Kolb, J. (2022a). *Lithium in Europa*, 101 S. (K. Steiger, C. Hilgers und J. Kolb, Hrsg.) Karlsruhe: ThinkTank für Industrielle Ressourcenstrategien.
- Sterba, J., Krzemien, A., Fernández, P. R., Escanciano García-Miranda, C., Valverde, G. F. (2019). Lithium mining: Accelerating the transition to sustainable energy. *Resources Policy*, 62, S. 416 - 426. doi: 10.1016/j.resourpol.2019.05.002.
- StMWi. (2021). *Rohstoffstrategie Bayern*. Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie Bayern. Von <https://www.stmwi.bayern.de/energie/bodenschaeetze/>. abgerufen
- Stober, I. (2014). *Hydrochemical properties of deep carbonate aquifers in the SW German Molasse basin*, 2 (13), 20 S. doi:10.1186/s40517-014-0013-1.
- Stratmann, K. (2023). Klimaneutralität: "Eigene Potentiale nutzen" Klimaschützer und Wissenschaftler fordern CO<sub>2</sub>-Speicher in Deutschland. *Handelsblatt online vom 05. Januar 2023*. Abgerufen am 06. Januar 2023 von <https://www.handelsblatt.com/politik/international/klimaneutralitaet-eigene-potenziale-nutzen-klimaschuetzer-und-wissenschaftler-fordern-co2-speicher-in-deutschland/28906808.html>.
- Sun, S., Shao, Z., Yu, H., Li, G. und Yi, B. (2014). Investigations on degradation of the long-term proton exchange membrane water electrolysis stack. *Journal of Power Sources*, S. 515 - 520. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.05.117.
- Sunfire GmbH. (2020). *GrInHy2.0: Sunfire liefert weltweit größten Hochtemperatur-Elektrolyseur an Salzgitter Flachstahl. Pressemitteilung vom 25. August 2020*. Dresden: Sunfire GmbH. Abgerufen am 29. September 2021 von <https://www.sunfire.de/de/news/detail/sunfire-liefert-weltweit-groessten-hochtemperatur-elektrolyseur-an-salzgitter-flachstahl>.
- Sunfire GmbH. (2021). Factsheet – Technical Data. *Sunfire-Hylink SOEC – Renewable Energy for all Applications*. Dresden: Sunfire GmbH. Von [https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Sunfire.de%20\(neu\)/Sunfire-Factsheet-HyLink-SOEC-20210303.pdf](https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Sunfire.de%20(neu)/Sunfire-Factsheet-HyLink-SOEC-20210303.pdf) abgerufen.
- Sunfire GmbH. (2021a). *GrInHy2.0: EU-Förderträger besichtigt weltweit größten Hochtemperatur-Elektrolyseur bei der Salzgitter Flachstahl GmbH. Pressemitteilung vom*

14. Juli 2021. Abgerufen am 29. September 2021 von <https://www.sunfire.de/de/news/detail/grinhy2-0-eu-foerdertraeger-besichtigt-weltweit-groessten-hochtemperatur-elektrolyseur-bei-der-salzgitter-flachstahl-gmbh>.
- Sunfire GmbH. (2022). Factsheet – Technical Data. *Sunfire-Hylink Alkaline – Renewable Hydrogen for all Applications*. Dresden: Sunfire GmbH. Von [https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Sunfire.de%20\(neu\)/Sunfire-Factsheet-HyLink-Alkaline\\_20220520.pdf](https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Sunfire.de%20(neu)/Sunfire-Factsheet-HyLink-Alkaline_20220520.pdf) abgerufen.
- Swain, B. (2017). Recovery and recycling of lithium: A review. *Separation and Purification Technology*, 172, S. 388 - 403.
- Szurlies, M. (2021). DERA Rohstoffinformationen 48. *Rohstoffrisikobewertung Nickel*, 114 S. Berlin: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).
- Tagesschau. (2021). *Der deutsche Lithium-Schatz vom 18. Oktober 2021 17:04 Uhr*. Abgerufen am 11. Juli 2022 von <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/der-deutsche-lithium-schatz-101.html>.
- Talens Peiro, L., Nuss, P., Mathieux, F. und Blengini, G. (2018). EUR 29435 EN. *Towards Recycling Indicators based on EU flows and Raw Materials System Analysis data*, 45 S. Luxemburg: Publications Office of the European Union. doi:10.2760/092885.
- Tarascon, J. M. (2010). Key challenges in future Li-battery research. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 368, S. 3227 - 3241. doi:10.1098/rsta.2010.0112.
- Tarascon, J. M. (2010a). Is lithium the new gold? *Nature Chemistry*, 2. Abgerufen am 11. März 2022 von <https://www.nature.com/articles/nchem.680>.
- Terlouw, T., Bauer, C., McKenna, R. und Mazzotti, M. (2022). Large-scale hydrogen production via water electrolysis: a techno-economic and environmental assessment. *Energy & Environmental Science*, 15, S. 3583 - 3602. doi:10.1039/d2ee01023b.
- Thielmann, A., Sauer, A. und Wietschel, M. (2015). *Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030*, 40 S. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Thielmann, A., Wietschel, M., Funke, S., Grimm, A., Hettesheimer, T., Langkau, S., Loibl, A., Moll, C., Neef, C., Plötz, P., Sievers, L., Espinoza, L. T., Edler, J. (2020). *Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf*. 36 S. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Thürmer, J. und Schuster, M. (2021). *Abhängigkeit von China: Die Folgen der Rohstoffknappheit. Bericht in PlusMinus vom 10. November 2021*. Das Erste. Abgerufen am 23. Dezember 2021 von <https://www.daserste.de/information/wirtschaft-boerse/plusminus/sendung/china-rohstoffe-engpass-100.html>.

- Tiess, G. (2009). *Rohstoffpolitik in Europa. Bedarf, Ziele, Ansätze*. Wien: Springer. doi:10.1007/978-3-211-09453-2.
- Tilton, J., Crowson, P., DeYoung Jr., J., Eggert, R., Ericsson, M., Guzmán, J., Humphreys, D., Lagos, G., Maxwell, P., Radetzki, M., Singer, D.A. and Wellmer, F.-W. (2018). Public policy and future mineral supplies. *Resources Policy*, 57, S. 55 - 60. doi:10.1016/j.resourpol.2018.01.006.
- Tomić, A., Pivac, I. und Barbir, F. (2023). A review of testing procedures for proton exchange membrane electrolyzer degradation. *Journal of Power Sources*. doi:10.1016/j.jpowsour.2022.232569.
- U.S. Department of Commerce. (2019). *A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals*, 50 S. U.S. Department of Commerce. Abgerufen am 12. Dezember 2021 von <https://www.commerce.gov/data-and-reports/reports/2019/06/federal-strategy-ensure-secure-and-reliable-supplies-critical-minerals>.
- U.S. Department of Energy. (2011). *Critical Materials Strategy*, 196 S. Abgerufen am 20. November 2020 von [https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE\\_CMS2011\\_FINAL\\_Full.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf).
- UBA. (2021). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2020, Mai 2021. 30 S. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-26\\_cc-45-2021\\_strommix\\_2021.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-26_cc-45-2021_strommix_2021.pdf).
- UBA. (2022). *Primärenergieverbrauch. Eintrag vom 25. März 2022*. Umweltbundesamt. Abgerufen am 16. Oktober 2022 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#definition-und-einflussfaktoren>.
- UBA. (2022a). *Endenergieverbrauch*. Umweltbundesamt. Abgerufen am 16. Oktober 2022 von <https://www.umweltbundesamt.de/service/glossar/e?tag=Endenergieverbrauch#alphabet>.
- UBA. (2022b). *Treibhausgas-Emissionen in der Europäischen Union*. Umweltbundesamt. Abgerufen am 16. Januar 2023 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#hauptverursacher>.
- UBA. (2022c). *Erneuerbare Energien in Zahlen*. Umweltbundesamt. Abgerufen am 30. Januar 2023 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#ueberblick>.
- UBA. (2022d). *Erneuerbare Energien in Deutschland – Daten zur Entwicklung im Jahr 2021*. Umweltbundesamt. Abgerufen am 30. Januar 2023 von [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/hg\\_erneuerbareenergien\\_dt\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/hg_erneuerbareenergien_dt_0.pdf).

- Übertragungsnetzbetreiber. (2020). *Bericht der deutschen Übertragungsnetzbetreiber zur Leistungsbilanz 2018 - 2022*, 34 S. 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH. Abgerufen am 28. November 2022 von [https://www.amprion.net/Dokumente/Netzkennzahlen/Leistungsbilanz/Bericht-zur-Leistungsbilanz/Bericht\\_zur\\_Leistungsbilanz\\_2019.pdf](https://www.amprion.net/Dokumente/Netzkennzahlen/Leistungsbilanz/Bericht-zur-Leistungsbilanz/Bericht_zur_Leistungsbilanz_2019.pdf).
- UM BaWü. (2016). *Landesstrategie Ressourceneffizienz Baden-Württemberg*. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Abgerufen am 31. Januar 2022 von [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6\\_Wirtschaft/Ressourceneffizienz\\_und\\_Umwelttechnik/160301\\_Landesstrategie\\_Ressourceneffizienz.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Ressourceneffizienz_und_Umwelttechnik/160301_Landesstrategie_Ressourceneffizienz.pdf).
- UN. (2020). *Sustainable Development Goals*, 68 S. United Nations Department of Global Communication. Abgerufen am 05. September 2022 von [https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2019/01/SDG\\_Guidelines\\_AUG\\_2019\\_Final.pdf](https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2019/01/SDG_Guidelines_AUG_2019_Final.pdf).
- UNFCCC. (1997). Beschluss: 1997, Inkrafttreten: 2005. *Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaveränderungen*, 40 S. Kyoto: Sekretariat der Klimarahmenkonvention (United Nations Framework Convention on Climate Change) mit Unterstützung des deutschen Bundesumweltministeriums. Abgerufen am 10. Januar 2023 von <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpger.pdf>.
- UNFCCC. (2015). *Paris Agreement*, 27 S. Abgerufen am 23. August 2022 von [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf).
- UnLimited. (2022). *Projektbeschreibung*. Abgerufen am 23. März 2022 von <https://www.geothermal-lithium.org/projektbeschreibung>.
- UnLimited. (2022a). *Erforschung von alternativen Lithiumsorbentien*. Abgerufen am 23. März 2022 von <https://www.geothermal-lithium.org/news/erforschung-von-alternativen-lithiumsorbentien>.
- Urbansky, F. (2017). Druckluftspeicher sind für Energiewende unwirtschaftlich. *Energiespeicher / Im Fokus | Online-Artikel*. Retrieved Januar 04, 2023, from <https://www.springerprofessional.de/energiespeicher/energie/druckluftspeicher-sind-fuer-energiewende-unwirtschaftlich/12275312>.
- USGS. (1996 - 2022). U.S. Geological Survey. *Mineral Commodity Summaries*. Abgerufen am 17. April 2022 von <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>.
- Valdez Salas, B. und Schorr Wiener, M. (2012). Desalination, Trends and Technologies. *Desalination and Water Treatment*, 42, S. 347 - 348. doi:10.1080/19443994.2012.683289.

- Vanuytrecht, E., Raes, D. und Wilems, P. (2014). Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. *Environmental Modelling & Software*, 51, S. 323 - 332. doi:10.1016/j.envsoft.2013.10.017.
- Väyrynen, A. und Salminen, J. (2012). Lithium ion battery production. *J. Chem. Thermodynamics*, 46, S. 80 - 85. doi:10.1016/j.jct.2011.09.005.
- VDI. (2020). VDI-Statusreport. *Strategische Nutzung von Rohstoffen in Deutschland*, 48 S. VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt. Abgerufen am 05. Juli 2021 von <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/vdi-statusreport-strategische-nutzung-von-rohstoffen-in-deutschland>.
- Velázquez-Martínez, O., Valio, J., Santasalo-Aarnio, A., Reuter, M., Serna-Guerrero, R. (2019). A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. *Batteries*, 5, 68. doi:10.3390/batteries5040068.
- VER. (2020). *Positive PFS & Maiden JORC Ore Reserve: Zero Carbon Lithium® Project*. ASX Release 15. Januar 2020. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 15. Januar 2021 von <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/6a9c79d2-5c99-40d7-ba32-72cd6ea3a6f6/PositivePreFeasibilityStudy>.
- VER. (2021). Unternehmenspräsentation vom 12. November 2021. *Direct Lithium Extraction (DLE) Technical Update*, 26 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 02. März 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/f52e369a-522.pdf>.
- VER. (2021a). *Binding lithium offtake agreement with Umicore*. ASX Release vom 18. Oktober 2021, 5 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 07. Juli 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/07faa4f6-336.pdf>.
- VER. (2021b). *Binding lithium offtake agreement with Renault*. ASX Release vom 22. November 2021, 4 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 07. Juli 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/970dcad4-ec1.pdf>.
- VER. (2021c). *Vulcan Energy signs lithium supply agreement with Stellantis*. ASX Release vom 29. November 2021, 4 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 07. Juli 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/6af825a6-35d.pdf>.
- VER. (2021d). *Binding lithium offtake agreement with Volkswagen Group*. ASX Release vom 08. Dezember 2021, 4 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 07. Juli 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/26da5058-1f4.pdf>.
- VER. (2022). *Corporate Presentation April 2022*, 56 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 01. Juli 2022 von <https://v-er.eu/wp-content/uploads/2022/04/Apr-Corp-Preso.pdf>.
- VER. (2022a). *Grant of further licenses significantly grows Zero Carbon Lithium™ Project*. ASX Release vom 04. Januar 2022. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 26. Januar 2022

- von <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/cdb9e9e7-e8d6-4fd1-8c0a-b6f77785de41/NewlicencessignificantlygrowsZeroCarbonLithiumProject>.
- VER. (2022b). *Agreement with Nobian for the development of the Central Lithium Plant*. ASX Release vom 11. Januar 2022. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 26. Januar 2022 von <https://vul.live.irmau.com/site/PDF/8af83d3f-6c26-4a6e-aa42-52315c5f89d2/AgreementwithNobianforthedevelopmentoftheCLP>.
- VER. (2022c). *Binding lithium offtake agreement with LG Energy Solution*. ASX Release vom 31. Januar 2022, 5 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 07. Juli 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/81420fef-8a4.pdf>.
- VER. (2022d). *Corporate Presentation. February 2022*, 58 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 01. Juli 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/1c6af37b-c1e.pdf>.
- VER. (2022e). *Corporate Presentation. July/August 2022*, 65 S. Vulcan Energy Resources. Abgerufen am 15. August 2022 von <https://www.investi.com.au/api/announcements/vul/fa49dc9c-01a.pdf>.
- Verhof, E., Dijkema, G. und Reuter, M. (2004). Process Knowledge, System Dynamics, and Metal Ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 8, S. 23 - 43. doi:10.1162/1088198041269382.
- VO 2021/1119 des Europäischen Parlaments und des Rates. (2021). Verordnung (30. Juni 2021). *Zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“)*. Amtsblatt der Europäischen Union.
- Volkswagen. (2021). *Volkswagen enters into strategic partnerships for the industrialization of battery technology*. Pressemitteilung vom 12. August 2021. Abgerufen am 31. August 2022 von <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/volkswagen-enters-into-strategic-partnerships-for-the-industrialization-of-battery-technology-7680>.
- Volkswagen. (2022). *Batteriezellenfabriken: Neue Kapazitäten in Europa*. Abgerufen am 01. Juli 2022 von <https://www.volkswagen.de/de/elektrofahrzeuge/elektromobilitaet-erleben/elektroauto-technologie/batteriezellenfabriken-neue-kapazitaeten-in-europa.html>.
- von Gangl. (2021). Gemeinderat Rheinmünster erteilt Suche nach Lithium und Erdwärme im Boden Absage. 06. Oktober 2021. *BNN – Badische Neuste Nachrichten*. Abgerufen am 03. November 2021 von <https://bnn.de/mittelbaden/buehl/rheinmuenster/gemeinderat-rheinmuenster-stoppt-suche-nach-lithium-und-erdwaerme-im-boden>.
- Wawer, T. (2022). *Elektrizitätswirtschaft* (1. Ausg.). Wiesbaden: Springer Gabler. doi:10.1007/978-3-658-38418-0.
- Weber, F., Kühne, O., Jenal, C., Aschenbrand, E. und Artukovic, A. (2018). *Sand im Getriebe. Aushandlungsprozesse um die Gewinnung mineralischer Rohstoffe aus konflikttheoretischer*

- Perspektive nach Ralf Dahrendorf.* (1, Hrsg.) Wiesbaden: Springer VS. doi:10.1007/978-3-658-21526-2.
- Wedig, M. (VRB) (2019). Sichere Rohstoffversorgung und die Rolle der Rohstoffgewinnung. *VRB – Vereinigung Rohstoffe und Bergbau e. V.*, 5 S. Abgerufen am 04. März 2021 von <https://consulting-fab.de/wp-content/uploads/2022/09/Sichere-Rohstoffversorgung-und-die-Rolle-der-Rohstoffgewinnung.pdf>.
- Weigel, M. (2014). Dissertation. *Ganzheitliche Bewertung zukünftig verfügbarer primärer Stahlherstellungsverfahren. Einschätzung der möglichen Rolle von Wasserstoff als Reduktionsmittel.* Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal. Abgerufen am 08. März 2021 von <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/year/2015/docId/5959>.
- Weil, M. und Ziemann, S. (2014). Recycling of Traction Batteries as a Challenge and Chance for Future Lithium Availability. *Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications. Lithium-Ion Batteries*, S. 509 - 528. doi:10.1016/B978-0-444-59513-3.00022-4.
- Weißborn, D. (2019). *Lithium – eine Chance auch für die deutsche Erdöl- und Erdgasbranche? Teil 2.* Abgerufen am 02. Januar 2022 von <https://www.erdoel-erdgas-deutschland.de/lithium-eine-chance-auch-fuer-die-deutsche-erdoel-und-erdgasbranche-teil-2/>.
- Wellmer, F.-W. (2008). Reserves and resources of the geosphere, terms so often misunderstood. 1. Is the life index of reserves of natural resources a guide to the future? *Z. dt. Ges.Geowiss.*, 159 (4), S. 575 - 590.
- Welter, F., May-Stobl, E., Schlömer-Laufen, N., Kranzusch, P. und Ettl, K. (2014). IfM-Materialien. *Das Zukunftspanel Mittelstand. Eine Expertenbefragung zu den Herausforderungen des Mittelstands.* Bonn: Institut für Mittelstandsforschung. Abgerufen am 05. Januar 2022 von [https://www.ifm-bonn.org/fileadmin/data/redaktion/publikationen/ifm\\_materialien/dokumente/IfM-Materialien-229.pdf](https://www.ifm-bonn.org/fileadmin/data/redaktion/publikationen/ifm_materialien/dokumente/IfM-Materialien-229.pdf).
- Wietschel, M., Zheng, L., Arens, M., Hebling, C., Ranzmeyer, O., Schaadt, A., Hank, C., Sternberg, A., Henkel, S., Kost, C., Ragwitz, M., Hermann, U., Pfluger, B. (2021). *Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats*, 87 S. Karlsruhe, Freiburg, Cottbus: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEG. Abgerufen am 14. Oktober 2022 von [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/Metastudie\\_Wasserstoff\\_Abschlussbericht.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/Metastudie_Wasserstoff_Abschlussbericht.pdf).
- Wohlrabe, K. (2021). Materialengpässe in der Industrie: Wer ist betroffen, und wie reagieren die Unternehmen? *ifo Schnelldienst*, 74(09), 60 - 65.
- Wrede, V. (2020). *Bergbau gleich Raubbau? Rohstoffgewinnung und Nachhaltigkeit.* (1, Hrsg.) Heidelberg: Springer Berlin. doi:10.1007/978-3-662-61941-4.

- Wuppertal Institut. (2014). An das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter Mitarbeit von Karin Arnold, Jonas Friege, Christine Krüger, Arjuna Nebel, Michael Ritthoff, Sascha Samadi, Ole Soukup, Jens Teubler, Peter Viebahn, Klaus Wiesen. *KRESSE - Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Abschlussbericht 0325324*, 277 S. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Abgerufen am 11. Januar 2021 von [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/5419/file/5419\\_KRESSE.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/5419/file/5419_KRESSE.pdf).
- WV Stahl. (2020). *Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2020*, 48 S. Wirtschaftsvereinigung Stahl. Abgerufen am 29. September 2021 von [https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl\\_Fakten-2020\\_rz\\_neu\\_Web1.pdf](https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Fakten-2020_rz_neu_Web1.pdf).
- WV Stahl. (2021). *Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2021*, 44 S. Wirtschaftsvereinigung Stahl. Abgerufen am 17. Oktober 2022 von <https://www.stahl-online.de/publikationen/fakten-zur-stahlindustrie-in-deutschland-2021/>.
- Xu, C., Dai, Q., Gaines, L., Hu, M., Tukker, A., Steubing, B. (2020). Future material demand for automotive lithium-based batteries. *Communications Materials*, 99, 10 S. doi: 10.1038/s43246-020-00095-x.
- Yan, Y., Fang, Q., Blum, L. und Lehnert, W. (2017). Performance and degradation of an SOEC stack with different cell components. *Electrochimica Acta*, S. 1254 - 1261. doi:10.1016/j.electacta.2017.11.180.
- Yilmaz, C. (2018). Dissertation. *Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Hochofenprozesses durch Einsatz von Wasserstoff*, 206 S. Clausthal-Zellerfeld. Abgerufen am 03. März 2021.
- Ziemann, S., Müller, D. B., Schebek, L., Weil, M. (2018). Modeling the potential impact of lithium recycling from EV batteries on lithium demand: A dynamic MFA approach. *Resources, Conservation und Recycling*, 133, S. 76 - 85. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.01.031.
- Zinnwald Lithium Plc. (2021). *Developing the next lithium producer in the heart of Europe*, 25 S. Corporate Presentation. Abgerufen am 08. August 2021 von <https://wp-zinnwald-lithium-2020.s3.eu-west-2.amazonaws.com/media/2021/07/04194422/ZNWD-presentation-05.07.21-2.pdf>.
- Zinnwald Lithium Plc. (2022). *Focused on becoming an important supplier to Europe's fast-growing battery sector*, 18 S. Corporate Presentation. Abgerufen am 07. Juli 2022 von <https://wp-zinnwald-lithium-2020.s3.eu-west-2.amazonaws.com/media/2022/03/Zinnwald-Investor-Presentation-16.03.22-Final.pdf>.