



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Technische Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

Dissertation

Untersuchung des Einflusses einzelner Rohstoffe auf die Absatzentwicklung alternativer PKW-Antriebskonzepte bis 2030

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Bernhard Geringer
Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, TU Wien

Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Herbert Demel
Institut für Managementwissenschaften, TU Wien

Dipl.-Ing. Christian Bauer
R. Schmidt Weg 9a
2371 Hinterbrühl
0526389

Hinterbrühl, September 2014

B14017

”But the real way to get happiness is by giving out happiness to other people. Try and leave this world a little better than you found it, and when your turn comes to die you can die happy in feeling that at any rate you have not wasted your time but have done your best.”

ROBERT BADEN-POWELL

Vorwort

Nach vier Jahren Arbeit liegt sie nun vor Ihnen: meine Dissertation. Sie entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien.

Zu besonderem Dank bin ich Univ.-Prof. Dr. Bernhard Geringer verpflichtet, zum einen für die Betreuung der Dissertation und zum anderen für die Möglichkeit, mich über den gesamten Zeitraum meiner Tätigkeit der Thematik meiner wissenschaftlichen Arbeit widmen konnte. Des Weiteren möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dr. Herbert Demel für seine kritischen Anmerkungen und die Übernahme der Zweitbetreuung bedanken.

Mein besonderer Dank gilt auch dem Österreichischen Verein für Kraftfahrzeugtechnik und da im Speziellen Univ.-Prof. Dr. Hans Peter Lenz für die fachlichen Diskussionen und die Ermöglichung dieser Arbeit.

Eine wissenschaftliche Arbeit entsteht nicht von im Alleingang. Herzlichen Dank gebührt daher meinen Kollegen, allen voran Dr. Werner Tober für die fachlichen Inhalte und Hilfestellung, die zum Gelingen dieser Arbeit einen bedeutenden Beitrag geleistet haben, sowie seinen aufmunternden Worten in schwierigen Zeiten und manchmal, dass er mich einfach ertragen hat.

Danken möchte ich aber auch meinen Eltern und Geschwistern, deren bedingungsloser und uneingeschränkter Unterstützung ich mir schon mein ganzes Leben lang sicher sein konnte. Ein besonderer Dank gilt meiner Freundin Romane – danke, dass es Euch gibt.

Last but not least möchte ich allen danken, die mich in meinen bisherigen Lebensabschnitten begleitet haben: All meinen Freunden, die mich immer wieder ermuntert und mich dabei unterstützt und bestärkt haben, weiterzumachen. Aber auch all jenen, die mir unermüdlich gesagt haben, dass etwas nicht so funktioniert, wie ich es mir in den Kopf gesetzt hatte. Die Motivation, euch das Gegenteil zu beweisen, hat mich zu dem gemacht, der ich heute bin.

Kurzfassung

Steigender ökologischer, ökonomischer und sozialer Druck führen dazu, dass Autohersteller, Politik und Gesellschaft ihr Mobilitätsverständnis überdenken. Elektrofahrzeuge, wobei auch Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge darunter verstanden werden, werden als eine mögliche Lösung angesehen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, wie sich der Absatz neuer PKW-Antriebskonzepte, unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses einzelner Rohstoffe, entwickelt.

Im Spannungsfeld zwischen Antriebskonzepten, Rohstoffen und Absatz werden drei Prognosemodelle – Nachfragemodell, Angebotsmodell und Rohstoffmodell – entwickelt, die die gegenseitigen Abhängigkeiten abbilden. Dabei werden die Auswirkungen der Rohstoffpreise durch die Entwicklung von Rohstoffpreisszenarien analysiert. Die Szenarien stellen die komplexe Dynamik der Rohstoffpreisbildung nach, aber auch unerwartete Trends werden in den Betrachtungen nicht vernachlässigt.

Im ersten Modell, dem Nachfragemodell, wird eine Methode entwickelt, bei dem unter Berücksichtigung von Rahmenbedingungen die Absatzzahlen der einzelnen Antriebskonzepte abgeschätzt werden. Die Auswirkungen auf die Kosten der Fahrzeuge wird im Angebotsmodell berechnet. Dazu werden Absatzszenarien entwickelt, die neben den Auswirkungen der Rohstoffpreise auch Schlüsse über den Einfluss möglicher Subventionen ermöglicht. Abgeschlossen werden die Betrachtungen mit dem Rohstoffmodell, das den Einfluss auf die Kritikalität der Rohstoffe durch den Absatz der Fahrzeuge ermöglicht.

Die Ergebnisse der Modelle zeigen, dass eine Beeinflussung durch einzelne Rohstoffe zwar gegeben ist, jedoch müssen für eine nachhaltige Absatzentwicklung der betrachteten PKW-Antriebskonzepte die gesamten Kosten gesenkt werden. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die verfügbare Reichweite und die benötigte Ladedauer ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf den Absatz nehmen. Durch die Rohstoffe Seltene Erden, Indium, Gallium und Germanium geht ein hohes Risiko aus.

Abstract

Increasing economic, ecological, and social pressure triggers automotive industry, politics and society to rethink the concept of mobility and yields the demand for a new model for mobility. An answer to this demand could be electric vehicles, as well as hybrid and fuel cell electrical vehicles. This work will provide an answer to the following question: How does the market of alternative car concepts develop under the influence of individual commodities?

Three forecastig models, namely the demand model, the supply model, and the commodity model, have been developed between the poles of car concepts, commodities, and sales. Commodity prices scenarios, describing the complex dynamics of commodity price formation, but also considering unexpected trends, analyze the effect of commodity prices on the manufacturing costs.

Firstly, in the demand model, a method is developed in which the sales of the individual car concepts will be appraised. The impact of the aforementioned sales results on the vehicles cost is evaluated in the second model, the supply model. The use of sale scenarios in the model enables to analyse not only the impact through commodity prices, but also of potential subsidies. Finally, the last model, the commodity model, investigates the impact of the sale of vehicles on the criticality of commodities.

The outcome of the study point out that the influence of individual commodities is indeed given, but the entire costs must get reduced of the considered alternative car concepts for an sustainable sales performance. Furthermore, it has been shown that the available range and required charging time also have a decisive influence on sales. The commodities: rare earth, indium, gallium and germanium bear a high risk for the car industry.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Zielsetzung und Methodik | 3 |
| 1.2 | Schlüsselbegriffe und Definitionen | 5 |
| 2 | Antriebskonzepte – Analyse alternativer PKW-Antriebskonzepte | 8 |
| 2.1 | Antriebskonzepte der Zukunft | 9 |
| 2.1.1 | Hybridfahrzeug | 10 |
| 2.1.2 | Range-Extender-Fahrzeug | 16 |
| 2.1.3 | Elektrofahrzeug | 17 |
| 2.1.4 | Brennstoffzellenfahrzeug | 18 |
| 2.2 | Betrachtete Antriebskonzepte in den Modellen | 19 |
| 2.3 | Technologien für die Elektrifizierung des Antriebsstranges | 23 |
| 2.3.1 | Energiewandler | 23 |
| 2.3.2 | Abgasnachbehandlung | 32 |
| 2.3.3 | Energiespeicher | 33 |
| 3 | Rohstoffe – Identifizierung der betrachteten Rohstoffe | 38 |
| 3.1 | Identifizierung kritischer Rohstoffe | 38 |
| 3.2 | Einsatz von Rohstoffen bei alternativen PKW-Antriebskonzepten | 43 |
| 3.3 | Analyse von Rohstoffen | 46 |
| 3.3.1 | Analyse der Angebotssituation | 46 |
| 3.3.2 | Analyse der Nachfragesituation | 48 |
| 3.4 | Anwendung der Analyse auf die eingesetzten Rohstoffe | 49 |
| 3.4.1 | Kobalt | 49 |
| 3.4.2 | Kupfer | 52 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.4.3 | Lithium | 55 |
| 3.4.4 | Graphit | 58 |
| 3.4.5 | Indium | 60 |
| 3.4.6 | Gallium | 62 |
| 3.4.7 | Germanium | 64 |
| 3.4.8 | Seltene Erden | 65 |
| 3.4.9 | Platingruppenmetalle | 67 |
| 4 | Absatzentwicklung – Ermittlung des gesamten Fahrzeugabsatzes und Analyse der Kosten | 70 |
| 4.1 | Entwickeln einer Absatzprognose | 71 |
| 4.1.1 | Entwicklung der Weltbevölkerung | 71 |
| 4.1.2 | Entwicklung der Fahrzeugdichte | 72 |
| 4.1.3 | Absatzprognose | 74 |
| 4.2 | Kostenentwicklungspotenziale | 78 |
| 4.2.1 | Rohstoffkosten | 80 |
| 4.2.2 | Fertigungskosten | 80 |
| 4.3 | Prognostizierte Preisentwicklung und Diffusionsentwicklungen | 82 |
| 4.4 | Simulation des Fahrzeugmarktes | 84 |
| 5 | Nachfragemodell – Ermittlung der Absatzentwicklung | 86 |
| 5.1 | Berechnungsmethode | 87 |
| 5.2 | Ergebnisse bei konstanten Rohstoffpreisen | 91 |
| 5.3 | Ergebnisse bei steigenden Rohstoffpreisen | 94 |
| 5.4 | Ergebnisse bei sinkenden Rohstoffpreisen | 96 |
| 5.5 | Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem Nachfragemodell | 98 |
| 6 | Angebotsmodell – Ermittlung der Herstellkosten | 99 |
| 6.1 | Ergebnisse bei konstanten Rohstoffpreisen | 101 |
| 6.2 | Ergebnisse bei steigenden und sinkenden Rohstoffpreisen | 103 |
| 6.3 | Ergebnisse bei durchschnittlicher Entwicklung der Rohstoffpreise | 106 |
| 6.4 | Untersuchung des Einflusses der Kundenwünsche im Angebotsmodell | 108 |
| 6.5 | Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem Angebotsmodell | 112 |

| | |
|--|------------|
| 7 Rohstoffmodell – Ermittlung des Einflusses auf und durch Rohstoffe | 114 |
| 7.1 Versorgungsrisiko | 117 |
| 7.1.1 Länderrisiko | 118 |
| 7.1.2 Marktrisiko | 119 |
| 7.1.3 Strukturrisiko | 120 |
| 7.1.4 Gewichtung des Versorgungsrisikos | 121 |
| 7.2 Vulnerabilität | 122 |
| 7.2.1 Anteil am Weltverbrauch | 122 |
| 7.2.2 Globaler Nachfrageimpuls | 123 |
| 7.2.3 Substituierbarkeit | 123 |
| 7.2.4 Gewichtung der Vulnerabilität | 124 |
| 7.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem Rohstoffmodell | 124 |
| 7.4 Implikation des Rohstoffrisikos für die Fahrzeugherstellkosten | 128 |
| 8 Diskussion der Modelle | 131 |
| 8.1 Herstellkosten der Fahrzeuge | 131 |
| 8.2 Lernrate | 133 |
| 8.2.1 Zielkosten: Fahrzeug | 133 |
| 8.2.2 Zielkosten: Traktionsbatterie | 135 |
| 8.3 Veränderung der Kundennachfrage | 138 |
| 8.4 Einfluss der Gewichtungen der Faktoren im Rohstoffmodell | 140 |
| 9 Zusammenfassung | 142 |
| Literaturverzeichnis | 147 |
| 10 Anhang | 156 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------------|---|
| Ah | Amperestunden |
| AFC | Alkaline Fuel Cell |
| a_i | Marktanteile [%] |
| b | Exponent für die Steigerungsrate, bestimmt durch die Lernrate [-] |
| b_k | Lernrate abhängig von der Komponente |
| BEV | Battery Electric Vehicle |
| BIP | Bruttoinlandsprodukt |
| C | Kohlenstoff |
| Cd | Cadmium |
| Co | Kobalt |
| Cu | Kupfer |
| CV | Conventional Vehicle |
| DMFC | Direct Methanol Fuel Cell |
| EU | Europäische Union |
| FCEV | Fuel Cell Electric Vehicle |
| Ga | Gallium |
| Ge | Germanium |
| GM | Gleichstrommaschine |
| HHI | Herfindahl-Hirschman-Index |
| In | Indium |
| kWh | Kilowattstunde |
| k | Anzahl an verbauten Komponenten |
| l | Liter |
| lb | Pfund (1Pfund = 0,453 592 370 Kilogramm) |
| Li | Lithium |
| metr.t | Metrische Tonne |
| MOFC | Molten Carbonate Fuel Cell |
| Ni | Nickel |

| | |
|----------------|--|
| NSK | NO_x -Speicher-Katalysator |
| OICA | International Organization of Motor Vehicle Manufacturers |
| oz. tr. | Feinunze (1 Feindunze = 31,1034768 Gramm) |
| PAFC | Phosporic Acid Fuel Cell |
| Pb | Blei |
| PEMFC | Proton Exchange Membrane Fuel Cell |
| PF | Rußpartikelfilter |
| PGM | Platingruppenmetalle: Ruthenium (Ru), Rhodium (Rh), Palladium (Pd), Osmium (Os), Iridium (Ir), Platin (Pt) |
| PHEV | Plug-In Hybrid Electric Vehicle |
| p_i | Produzierte Menge [kg] |
| r | Anzahl an verbauten Rohstoffen [-] |
| REX | Range-Extender Vehicle |
| r_r | Preis des Rohstoffes r [€] |
| SCR | SCR-Katalysator |
| SEE | Seltene Erden: Scandium (Sc), Yttrium (Y), Lanthanoide |
| SOFC | Solid Oxide Fuel Cell |
| t | Tonne |
| TFM | Transversalflussmaschine |
| TWC | Drei-Wege-Katalysator |
| u_k | Eingesetzte Menge des Rohstoffs r [kg] |
| UNO | Vereinte Nationen |
| V | Volt |
| VKM | Verbrennungskraftmaschine |
| W | Watt |
| y | Herstellkosten [€] |
| y_D | Fertigungskosten [€] |
| y_E | Rohstoffkosten [€] |
| y_{k_1} | Fertigungskosten je Komponenten für das erste Stück [€] |
| y_x | Herstellkosten für das x-te stück [€] |
| ZEBRA | Natrium-Nickelchlorid-Hochtemperatur-Batterie |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Zielsetzung der Arbeit und Ableitung der drei damit einhergehenden Themenblöcke | 3 |
| 1.2 | Definition von Reserve und Ressource | 6 |
| 2.1 | Strukturen der Hybridantriebe | 11 |
| 2.2 | Übersicht der verschiedenen Hybridisierungsklassen und deren Nutzen | 12 |
| 2.3 | Anordnung der Komponenten beim Micro Hybrid Fahrzeug | 13 |
| 2.4 | Anordnung der Komponenten beim Mild Hybrid Fahrzeug | 14 |
| 2.5 | Anordnung der Komponenten beim Full Hybrid Fahrzeug | 15 |
| 2.6 | Anordnung der Komponenten beim Plug-In Hybrid Fahrzeug | 16 |
| 2.7 | Anordnung der Komponenten beim Range-Extender-Fahrzeug | 17 |
| 2.8 | Anordnung der Komponenten beim Elektrofahrzeug | 18 |
| 2.9 | Anordnung der Komponenten beim Brennstoffzellenfahrzeug | 19 |
| 2.10 | Zusammenfassung des definierten Fahrkonzeptportfolios | 22 |
| 2.11 | Schematische Darstellung des Aufbaus und der Funktionsweise einer PEMFC | 29 |
| 2.12 | Aufbau und Abläufe einer Batterie | 34 |
| 3.1 | Berücksichtigte Rohstoffe aus dem Periodensystem | 41 |
| 3.2 | Rohstoffkreis | 42 |
| 3.3 | Größte Abbauländer von Kobalt im Jahr 2010 | 51 |
| 3.4 | Größte Abbauländer von Kupfer im Jahr 2010 | 54 |
| 3.5 | Größte Abbauländer von Lithium im Jahr 2010 | 57 |
| 3.6 | Größte Abbauländer von Graphit im Jahr 2010 | 59 |
| 3.7 | Größte Abbauländer von Indium im Jahr 2010 | 61 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.8 | Größte Abbauländer von Gallium im Jahr 2010 | 63 |
| 3.9 | Größte Abbauländer von Germanium im Jahr 2010 | 64 |
| 3.10 | Größte Abbauländer von Seltenen Erden im Jahr 2010 | 66 |
| 3.11 | Größte Abbauländer der Platingruppenmetalle im Jahr 2010 | 68 |
| 4.1 | Entwicklung der Weltbevölkerung von 2010 bis 2030 | 72 |
| 4.2 | Entwicklung des weltweiten Fahrzeugbestandes bis 2030 | 77 |
| 5.1 | Entwicklung der Fahrzeugproduktion und Herstellkosten in Abhängigkeit von gleichbleibenden Rohstoffpreisen (Szenario I) | 93 |
| 5.2 | Entwicklung der Fahrzeugproduktion und Herstellkosten in Abhängigkeit von steigenden Rohstoffpreisen (Szenario V) | 95 |
| 5.3 | Entwicklung der Fahrzeugproduktion und Herstellkosten in Abhängigkeit von sinkenden Rohstoffpreisen (Szenario IX) | 97 |
| 6.1 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Angebotsszenario (Szenario 1: Verbrennerwelt) | 100 |
| 6.2 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Angebotsszenario (Szenario 2: Elektrowelt) | 100 |
| 6.3 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Angebotsszenario (Szenario 3: Wasserstoffwelt) | 101 |
| 6.4 | Entwicklung der Fahrzeugkosten in Szenario I | 103 |
| 6.5 | Entwicklung der Fahrzeugkosten in Szenario V | 105 |
| 6.6 | Entwicklung der Fahrzeugkosten in Szenario IX | 107 |
| 6.7 | Entwicklung der Fahrzeugkosten in Szenario X | 108 |
| 6.8 | Verknüpfung von Angebots- und Nachfragemodell | 109 |
| 6.9 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfrageszenario bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen in der Verbrennerwelt | 111 |
| 6.10 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfrageszenario bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen in der Elektrowelt | 111 |
| 6.11 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfrageszenario bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen in der Wasserstoffwelt | 112 |
| 7.1 | Rohstoffmodell – Szenario 1: Verbrennerwelt | 126 |
| 7.2 | Rohstoffmodell – Szenario 2: Elektrowelt | 127 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 7.3 | Rohstoffmodell – Szenario 3: Wasserstoffwelt | 127 |
| 7.4 | Entwicklung der Fahrzeugkosten bei unterschiedlichen Rohstoffpreis- entwicklungen | 130 |
| 8.1 | Entwicklung der Fahrzeugkosten bei veränderten Herstellkosten im Jahr 2010 | 133 |
| 8.2 | Entwicklung der Fahrzeugherstellkosten bei gleichbleibenden Roh- stoffpreisen und Zielkosten des BEV wie die des CV | 135 |
| 8.3 | Entwicklung der Fahrzeugherstellkosten bei gleichbleibenden Roh- stoffpreisen und Zielkosten der Traktionsbatterie von unter 200 €/kWh | 137 |
| 8.4 | Entwicklung der Fahrzeugproduktion bei gleichbleibenden Rohstoff- preisen (Szenario I) und Zielkosten der Traktionsbatterie von unter 200 €/kWh | 138 |
| 8.5 | Entwicklung der Fahrzeugproduktion bei gleichbleibenden Rohstoff- preisen (Szenario I) und veränderten Kundenanforderungen | 140 |
| 8.6 | Rohstoffmodell – Szenario 3: Wasserstoffwelt mit gleichverteilter Ge- wichtung der Faktoren | 141 |
| 10.1 | Szenario I: Konstante Rohstoffpreisentwicklung | 156 |
| 10.2 | Szenario II: Anstieg der Rohstoffpreise um 1 % pro Jahr | 157 |
| 10.3 | Szenario III: Anstieg der Rohstoffpreise um 2 % pro Jahr | 157 |
| 10.4 | Szenario IV: Anstieg der Rohstoffpreise um 5 % pro Jahr | 158 |
| 10.5 | Szenario V: Anstieg der Rohstoffpreise um 10 % pro Jahr | 158 |
| 10.6 | Szenario VI: Absinken der Rohstoffpreise um 1 % pro Jahr | 159 |
| 10.7 | Szenario VII: Absinken der Rohstoffpreise um 2 % pro Jahr | 159 |
| 10.8 | Szenario VIII: Absinken der Rohstoffpreise um 5 % pro Jahr | 160 |
| 10.9 | Szenario IX: Absinken der Rohstoffpreise um 10 % pro Jahr | 160 |
| 10.10 | Szenario X: Lineare Entwicklung der Rohstoffpreise | 161 |
| 10.11 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Sze- nario I) | 162 |
| 10.12 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Sze- nario II) | 162 |
| 10.13 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Sze- nario III) | 163 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 10.14 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario IV) | 163 |
| 10.15 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario V) | 164 |
| 10.16 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario VI) | 164 |
| 10.17 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario VII) | 165 |
| 10.18 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario VIII) | 165 |
| 10.19 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario IX) | 166 |
| 10.20 | Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario X) | 166 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Übersicht der Leistungsmerkmale elektrischer Maschinen | 27 |
| 2.3 | Gegenüberstellung der technischen Parameter verschiedener Batterie- typen | 37 |
| 3.1 | Rohstoffeinsatz pro Komponente | 45 |
| 3.2 | Kobalt-Minerale | 49 |
| 3.3 | Kupfer-Minerale | 53 |
| 3.4 | Lithiumführende Minerale | 56 |
| 4.1 | Fahrzeugdichte von 2003-2009 in den verschiedenen Weltregionen . | 73 |
| 4.2 | Ergebnisse der Berechnung des Austauschs | 76 |
| 4.3 | Wachstum der Fahrzeugdichte pro 1.000 Einwohner in Abhängigkeit zum Bruttoinlandsprodukt | 78 |
| 4.4 | Herstellkosten nach Antriebskonzepten im Jahr 2010 | 79 |
| 4.5 | Kostenreduzierungspotenziale für E-Komponenten | 82 |
| 5.1 | Reichweite von Elektrofahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterie . . | 88 |
| 5.2 | Kundenakzeptanz – Reichweite | 89 |
| 5.3 | Ladedauer von Elektrofahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterie . . . | 89 |
| 5.4 | Kundenakzeptanz – Ladedauer | 90 |
| 5.5 | Kundenakzeptanz – Anschaffungspreis | 90 |
| 7.1 | Rohstoffverbrauch bis 2030 – Szenario 1: Verbrennerwelt | 115 |
| 7.2 | Rohstoffverbrauch bis 2030 – Szenario 2: Elektrowelt | 116 |
| 7.3 | Rohstoffverbrauch bis 2030 – Szenario 3: Wasserstoffwelt | 116 |
| 7.4 | Beurteilungskriterien – Statische Reichweite | 120 |
| 7.5 | Beurteilungskriterien – Ressourcenreichweite | 120 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 7.6 | Beurteilungskriterien – Primärproduktion versus Co-Produktion | 120 |
| 7.7 | Beurteilungskriterien – Recyclingfähigkeit | 121 |
| 7.8 | Zusammenfassung des Versorgungsrisikos | 122 |
| 7.9 | Beurteilungskriterien – Anteil am Weltproduktion | 123 |
| 7.10 | Beurteilungskriterien – Nachfrageimpuls | 123 |
| 7.11 | Beurteilungskriterien – Substituierbarkeit | 124 |
| 7.12 | Zusammenfassung der Vulnerabilität | 124 |
| 7.13 | Zusammenfassung der Ergebnisse des Rohstoffmodells | 128 |
| 8.1 | Herstellkosten nach Antriebskonzepten im Jahr 2010 | 132 |
| 8.2 | Kostenreduzierungspotenziale für E-Komponenten | 134 |
| 8.3 | Akzeptierte Reichweite ab 2020 | 139 |
| 8.4 | Akzeptierte Ladedauer ab 2020 | 139 |
| 8.5 | Akzeptierter Anschaffungspreis ab 2020 | 140 |
| 10.1 | US-Dollar/Euro-Wechselkurs im Jahresdurchschnitt von 2000-2010 | 167 |
| 10.2 | Bevölkerungsentwicklung (2010-2030) | 168 |
| 10.3 | Eingangsdaten für den Rohstoff Kobalt von 2000-2010 | 170 |
| 10.4 | Eingangsdaten für den Rohstoff Kupfer von 2000-2010 | 171 |
| 10.5 | Eingangsdaten für den Rohstoff Lithium von 2000-2010 | 172 |
| 10.6 | Eingangsdaten für den Rohstoff Graphit von 2000-2010 | 173 |
| 10.7 | Eingangsdaten für den Rohstoff Indium von 2000-2010 | 174 |
| 10.8 | Eingangsdaten für den Rohstoff Gallium von 2000-2010 | 175 |
| 10.9 | Eingangsdaten für den Rohstoff Germanium von 2000-2010 | 176 |
| 10.10 | Eingangsdaten für die Seltenen Erden von 2000-2010 | 177 |
| 10.11 | Eingangsdaten für die Platingruppenmetalle von 2000-2010 | 178 |

Kapitel 1

Einleitung

Steigende Weltbevölkerungszahlen, steigende Fahrzeugdichten und steigender Energiebedarf sind nur drei Beispiele für eine sich stetig weiterentwickelnde Welt. In Ländern wie Brasilien, Russland, Indien und China sind zur Zeit enorme Entwicklungen, sowohl bei der Bevölkerungsdichte, als auch hinsichtlich ihrer Wirtschaft zu bemerken. Das Wachstum, gesehen über mehrere Jahrzehnte, basiert jedoch darauf, dass Güter – Waren, Personen – in kurzer Zeit von einem Ort zu einem anderen Ort transportiert werden können. [1]

Heute jedoch stellt genau dieser Individualverkehr und das damit verbundene Mobilitätsverständnis die Menschen vor ganz neue Herausforderungen. Die Bevölkerungszahlen sind gestiegen, damit die Zahl des weltweiten Fahrzeugbestands und die Nachfrage nach Rohöl. Seit vielen Jahren wird das kommende Ende des Öls prophezeit, aber nicht nur diese „Verknappung“, sondern auch die ökologischen Auswirkungen, insbesondere auf das Klima, werden intensiv diskutiert. Dies hat in den vergangenen Jahren die Suche nach alternativen Fortbewegungskonzepten und die Entwicklung von Elektrofahrzeugen vorangetrieben.

Parallel dazu ist die Diskussion über die Verfügbarkeit von mineralischen Rohstoffen¹, und deren Einfluss auf die Wirtschaft in den letzten Jahren stark gestiegen. Dass diese die Stabilität der Weltwirtschaft beeinflussen können, wird eindrucksvoll durch täglich neue Meldungen in den Wirtschaftsmedien vorgeführt. [2]

Die Weltbevölkerung steht daher zwischen den beiden Fronten. Auf der einen Seite das Verlangen nach Wachstum und dem damit verbundene Wunsch nach unbegrenzter Mobilität und auf der anderen Seite die Verfügbarkeit von Rohstoffen.

¹Mineralische Rohstoffe sind jene Materialien, die sich in geologischen Prozessen im Laufe der Zeit gebildet haben.

Es gilt daher zu untersuchen, wie sich diese Wünsche auf die Fahrzeuge auswirken.

Der Fokus der Arbeit liegt auf zweispurigen Kraftfahrzeugen zum Zweck der Beförderung von Personen, Personenkraftwagen (PKW) genannt. Massenbeförderungsmittel, die dazu dienen, Menschen in großen Mengen zu transportieren liegen ebenso außerhalb des Betrachtungsumfanges, wie flurgebundene, gleisgebundene oder spurgeführte Fördermittel.

Als Grundlage dient die Studie [3], welche im Rahmen der RAW MATERIAL INITIATIVE jene kritischen Rohstoffe identifiziert, die das Funktionieren der europäischen Wirtschaft² gefährden könnten, siehe *Abschnitt 3.1*. Als kritische Rohstoffe werden in der Studie all jene bezeichnet, bei der die beiden Indikatoren „Versorgungsrisiko“ und „Folgen einer mangelnden Versorgung“ als hoch eingeschätzt werden. In Anlehnung dazu werden als kritische Rohstoffe bzw. Rohstoffgruppen folgende bezeichnet: Antimon, Beryllium, Germanium, Gallium, Magnesium, Seltene Erden, Platingruppenmetalle, Indium, Kobalt, Flussspat, Tantal, Wolfram, Niob und Graphit.

Zur Bestimmung der notwendigen Rohstoffmenge für diese Arbeit werden jene Rohstoffe berücksichtigt, die im ersten Lebenswegabschnitt eines Fahrzeuges, der Herstellung der Fahrzeuge, verbaut werden. Es werden daher keine Rohstoffe, die in den beiden letzten Lebenswegabschnitten – Nutzung und End-of-Life – notwendig sind, untersucht. Weiters werden jene Rohstoffe, die für Fertigungsmaschinen oder zum Betrieb dieser notwendig sind, nicht in die Betrachtungen aufgenommen.

Nicht berücksichtigt wird, dass der Absatz der Fahrzeuge durch die verfügbare Tankstellen- und Ladeinfrastruktur beeinflusst wird. Unter anderem wird davon ausgegangen, dass die notwendige Energie und Energiestoffe – wie Strom, Wasserstoff und Rohöl – in ausreichender Menge zur Verfügung stehen. Des Weiteren werden politischen Einflussfaktoren, wie zum Beispiel der Normung von Ladesteckern, Zielvorgaben durch Regierungen oder Emissionsgrenzwerte in dieser Arbeit kein Augenmerk geschenkt. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Beeinflussung der verfügbaren Menge im Rohstoffpreis widerspiegeln. Rohstoffe, die durch Recycling im Lebenswegabschnitt End-of-Life gewonnen werden können, werden nicht in die Betrachtungen aufgenommen, da es keine weltweit einheitlichen Regeln dazu gibt. Es kann auch nicht davon ausgegangen werden, dass die betrachteten Rohstoffe ausschließlich durch die Fahrzeugindustrie benutzt werden. Folglich ist es auch nicht

²Auch andere Nationen und Staatenbünde, wie z. B. die Vereinigten Staaten, haben ähnliche Studien durchgeführt, die zu ähnlichen Ergebnissen gekommen sind. Siehe dazu Studie [4]

möglich, einen daraus möglichen Fehler hinsichtlich der Beurteilung der Kritikalität abschätzen zu können. Der Zeithorizont wurde bis 2030 bestimmt.

1.1 Zielsetzung und Methodik

Ziel der Arbeit ist die Beantwortung der zentralen Frage, ob die Absatzentwicklung von neuen PKW-Antriebskonzepten (bis 2030) durch einzelne Rohstoffe beeinflusst werden kann. Die Frage baut sich aus dem Zusammenspiel dreier Themenblöcke – Antriebskonzepte, Rohstoffe und Absatz – auf, welche sich gegenseitig beeinflussen bzw. direkt voneinander abhängig sind. Die Gliederung der Arbeit orientiert sich daher auch an dieser Aufteilung (siehe *Abbildung 1.1*). Die zentrale Herausforderung bei der Bearbeitung der Frage besteht darin, dass alle drei Blöcke in einer engen Abhängigkeit zueinander stehen.

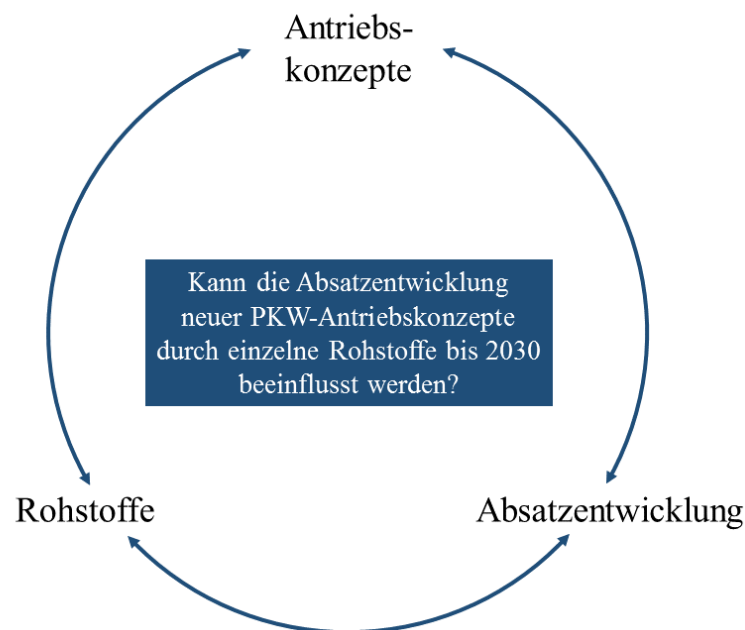


Abbildung 1.1: Zielsetzung der Arbeit und Ableitung der drei damit einhergehenden Themenblöcke

Basierend auf der zentralen Frage und unter Berücksichtigung der Abhängigkeiten werden zunächst die drei Themen getrennt bearbeitet und im Anschluss die Verbindungen, in den jeweils dazu entwickelten Modellen, besprochen.

Antriebskonzepte Zunächst soll in *Abschnitt 2.1* der Frage nachgegangen werden, wie mögliche Antriebskonzepte für den Individualverkehr aussehen können. Abgeschlossen wird die Betrachtung mit der Definition jener Fahrzeuge, die für die weiteren Betrachtungen in der Studie (siehe *Abschnitt 2.2*) herangezogen werden. Um die Konzepte und die eingesetzten Technologien besser verstehen zu können, werden sie im nächsten *Abschnitt 2.3* besprochen. Dies basiert vor dem Hintergrund, dass es aufgrund verschiedener Knappheiten zu einer Substitution, zum Beispiel des Rohstoffes oder der gesamten Technologie, kommen kann. Andererseits ist eine Analyse notwendig, um die in *Abschnitt 3.2* durchgeführten Abschätzungen der Rohstoffmengen pro Fahrzeug erstellen zu können.

Rohstoffe Das zweite Themenfeld beschäftigt sich mit den Rohstoffen, die in den eingesetzten Technologien vorkommen. Dabei werden im ersten Teil des *Abschnitts 3* die Grundlagen über den Abbau von Rohstoffen, den Rohstoffmarkt und die Preisbildung erklärt. Anschließend wird die Frage beantwortet, welche Faktoren die Rohstoffe beeinflussen. Dies ist die notwendige Grundlage für die Analysen der eingesetzten Rohstoffe (siehe *Abschnitt 3.4.1-3.4.9*).

Absatzentwicklung Der letzte eigenständig betrachtete Themenblock ist die Absatzentwicklung. Wobei zunächst in *Abschnitt 4.1.3* geklärt wird, wie sich der gesamte Fahrzeugbestand bis 2030 entwickelt. Abgeleitet davon, kann dann eine Absatzprognose erstellt werden, welche klärt, wie viele Fahrzeuge, unabhängig vom Antrieb, in den jeweiligen Jahren produziert werden müssen. Danach wird im *Abschnitt 4.2* das Thema der Herstellkosten besprochen und eine Aufteilung der Kosten – Einfluss der Rohstoffkosten und der produzierten Fahrzeuge – berücksichtigt.

Der zweite Abschnitt dieses Teiles (siehe *Abschnitt 4.4*) widmet sich dem Thema des Fahrzeugmarktes, wobei nun geklärt werden soll, welche Antriebskonzepte in welcher Anzahl auf den Markt kommen. Es stellt sich insbesondere die Frage, welche Fahrzeugantriebe in welcher Menge verbaut werden. Dies klärt eine Betrachtung der zukünftigen Verteilung der Antriebskonzepte am Fahrzeugmarkt, wobei einerseits die Bedürfnisse der Kunden berücksichtigt werden, die vom heutigen Wissenstand ausgehen, und mögliche technische Entwicklungen andererseits.

Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Beantwortung der Frage, wie die Rohstoffpreise im zeitlichen Verlauf bis 2030 auf die Fahrzeugherstellkosten Einfluss nehmen können. Dazu dienen die in *Abschnitt 4.3* erstellten Szenarien, die alle möglichen Entwicklungen berücksichtigen.

Nachfragemodell Welchen Einfluss haben die Rohstoffpreise und die damit berechneten Herstellkosten der Fahrzeuge auf den Absatz der Fahrzeuge? Basierend auf Szenarien der Rohstoffpreisentwicklung, werden die Kosten der Fahrzeuge berechnet. Im Nachfragemodell werden die Bedürfnisse der Käufer mitberücksichtigt und anschließend daraus Absatzszenarien abgeleitet. Neben den Kundenbedürfnissen sind auch technische Verbesserungen, wie verkürzte Ladezeiten und verlängerte Reichweiten mit eingerechnet.

Angebotsmodell In diesem Modell wird die Frage beantwortet (siehe *Kapitel 6*), wie sich mögliche Absatzverteilungen der Antriebskonzepte auf die Fahrzeugherstellkosten auswirken. Es ist eine durch äußere Einflussfaktoren, wie zum Beispiel Politik, Gesellschaft oder dem allgemeinen Umweltgedanken, getriebenes Modell. Dazu werden die Herstellkosten unter Zuhilfenahme von Verteilungen berechnet und der Einfluss durch Rohstoffpreisentwicklungen angegeben. In einem weiteren Schritt werden dann, basierend auf der Methode aus dem Nachfragemodell, die Absatzzahlen unter Berücksichtigung der Kundenwünsche in Anlehnung an das Nachfragemodell überprüft.

Rohstoffmodell Das Modell (siehe *Kapitel 7*) untersucht, ob sich durch die veränderte Rohstoffnachfrage, die Kritikalität jener verändert. Zu Beginn werden die benötigten Rohstoffmengen in den verschiedenen Szenarien berechnet, welche in den Kapiteln zuvor entwickelt wurden. Durch die anschließende Bewertung der Eigenschaften der Rohstoffe kann die Kritikalität berechnet werden.

1.2 Schlüsselbegriffe und Definitionen

Um die im weiteren Verlauf der Arbeit benützten Begriffe zu verstehen, müssen sie einer einheitlichen Definition folgen. Die wichtigsten Begriffe werden nun im Folgenden in Anlehnung an [3] definiert.

Rohstofflagerstätte Ist jede Ansammlung an Rohstoffen, die einen ökonomischen Wert besitzen. Der Wert ist abhängig von der verfügbaren Rohstoffmenge, den Kosten, um den Rohstoff abzubauen, seinem momentanen und zukünftigen Marktpreis und dem politischen und sozialen Umfeld, um die Lagerstätte abzubauen zu dürfen.

Reserve In *Abbildung 1.2* wird die Abgrenzung dargestellt, dementsprechend definieren sich Reserven als jene Rohstoffmenge, die bereits nachgewiesen ist und von der ausgegangen wird, dass der Rohstoff zu aktuellen Marktpreisen ökonomisch abbaubar ist.

Ressourcen Den Reserven gegenüber stehen die Ressourcen. Sie sind entweder noch nicht entdeckt, aber aufgrund geologischer Gegebenheiten vorhanden, oder zu aktuellen Kosten noch nicht wirtschaftlich abbaubar. Hier zeigt sich, dass sich die Grenzen bei Änderungen der Abbautechnologien, Preisen oder bei geänderter Nachfrage in beide Richtungen verschieben können.

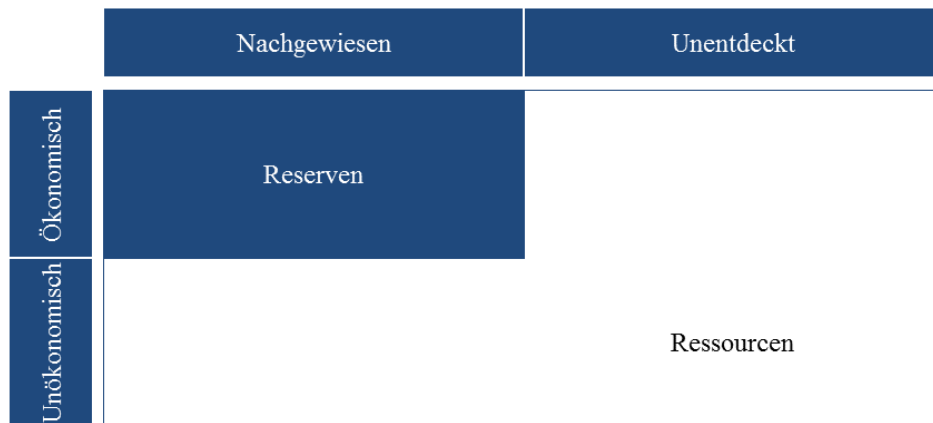


Abbildung 1.2: Definition von Reserve und Ressource [5], [Eigene Darstellung]

Herfindahl Hirschmann Index (HHI) Nach [6] wird der HHI als ein Maß zur Berechnung der Konzentration der einzelnen Marktteilnehmer am Markt definiert. Er ist die Summe der quadrierten Marktanteile a_i (in Prozent) der einzelnen Länder. Die Marktanteile sind die Anteile der abgebauten Menge pro Land, in Abhängigkeit von der Gesamtabbaumenge.

Im Fall, dass ein Land den Markt und in weiterer Folge die Nachfrage alleine bedient, dann kann davon ausgegangen werden, dass es einen Marktanteil von 100 % und nach *Formel 1.1* einen HHI von 10.000 hat. Der Markt gilt als mäßig konzentriert bei einem HHI zwischen 1.000 und 2.000 (in den USA spricht man schon bei einem Wert bis zu 1.800 von mäßig konzentriert). Bei Werten darüber wird der Markt als konzentriert bezeichnet. Je näher der Wert

bei 0 liegt, desto unkonzentrierter ist der Markt. Die Konzentration ist sehr hoch, wenn entweder die Anzahl der Unternehmen/Länder sehr gering ist, oder wenn einige wenige hohe Marktanteile besitzen. [6]

$$HHI = \sum_{i=1}^n a_i^2 \quad (1.1)$$

Für Kupfer (siehe *Abschnitt 3.4.2* und *Tabelle 10.4*) ergibt sich so ein HHI für die Produktion von 1.438 im Jahr 2010. Der Markt wird daher als mäßig konzentriert bezeichnet. Im Vergleich dazu haben die SEE (siehe *Abschnitt 3.4.8* und *Tabelle 10.10*) ein HHI von 9.504 im Jahr 2010. Es wird daher von einem konzentrierten Markt gesprochen.

Antriebskonzepte Unter dem Antriebskonzept versteht man die Anordnung all jener Baugruppen, wie zum Beispiel Verbrennungskraftmaschine, Elektromotor, Brennstoffzelle, Batterie etc., die zum Antrieb eines Fahrzeug gehören.

Preise Der Preis stellt jenen Wert dar, auf den sich der Käufer und Verkäufer einigen. Aus der Sicht des Käufers ist es jener Punkt den er bereit ist für ein Gut zu zahlen und der Verkäufer das Gut zu verkaufen.

Herstellkosten Unter Herstellkosten versteht man den Wert eines Gutes. Sie sind jene Kosten die durch die Fertigung eines Gutes und dem notwendigen Materialkosten entstehen, wobei Verwaltungs- und Vertriebsgemeinkosten, Steuern, etc. nicht dazu gezählt werden. In der Fahrzeugindustrie kann davon ausgegangen werden, dass letztere etwa die Herstellkosten verdoppeln.

Kapitel 2

Antriebskonzepte – Analyse alternativer PKW-Antriebskonzepte

Zur Bestimmung des Aufbaus der Antriebskonzepte muss zunächst geklärt werden, was darunter verstanden wird. Als Antrieb bezeichnet man all jene Baugruppen, die für den Vortrieb eines Fahrzeuges benötigt werden und umfasst die Baugruppen: Energiewandler, Getriebe, Übertragungselemente und Energiespeicher. [7] Unter Antriebskonzept versteht man die Anordnung der Baugruppen in einem Fahrzeug.

In *Abschnitt 2.1* wird geklärt, welche Antriebskonzepte in Zukunft möglich sind. Die Art des Konzeptes hängt maßgeblich von den eingesetzten Baugruppen ab. Wie in [8] beschrieben, werden derzeit Fahrzeuge für den Individualverkehr in der Regel mit Verbrennungskraftmaschinen betrieben, wobei als Treibstoff lediglich Benzin und, insbesondere in Österreich [9], Diesel eingesetzt werden.

Im anschließenden Kapitel werden dann mögliche Antriebskonzepte besprochen, die zur Identifizierung jener Konzepte dienen, die aus heutiger Sicht innerhalb des Betrachtungszeitraums machbar sind und welche potenziellen Wege eingeschlagen werden können. Für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit werden dann die Überlegungen auf diese Konzepte gestützt. Den Ausführungen folgt eine kurze Beschreibung der eingesetzten Technologien und möglichen Optimierungsmaßnahmen, welche zum Aufzeigen der Potenziale und zur Rohstoffbestimmung dient (siehe *Abschnitt 2.3*).

2.1 Antriebskonzepte der Zukunft

Welche PKW-Antriebskonzepte sind aus technischer und wirtschaftlicher Sicht bis 2030 möglich? Möglich sind all jene Konzepte, die dazu dienen, eine Person von einem Ort zu einem anderen bringen zu können. In *Kapitel 1* wurde definiert, dass die Art der Betankung bzw. der Beladung in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Neu entwickelte Antriebskonzepte hängen im Wesentlichen von der Art ihrer Energiewandler und Energiespeicher ab. Autohersteller haben in den vergangenen Jahren viele verschiedene Konzepte vorgestellt. Als Energiewandler wird jene Baugruppe verstanden, die Energie von einer Form in eine andere wandelt. Zum Zweck des Antriebs muss, durch den Einsatz unterschiedliche Energiewandler, elektrische oder chemische Energie in mechanische Energie verwandelt werden. Die Verbrennungskraftmaschine zum Beispiel wandelt chemisch gespeicherte Energie durch Verbrennung in mechanische Energie um. Abhängig vom eingesetzten Energiewandler muss die Energie in unterschiedlichen Speichersystemen im Fahrzeug mitgeführt werden:

Mechanische Speicher Bezeichnen Systeme, in denen mit Hilfe von Schwungrädern, Federspeicher oder Druckspeicher Energie gespeichert wird [10]. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass der Wirkungsgrad dieser Systeme aufgrund der Reibung in den Lagern, sowie die daraus resultierende Energiespeicherfähigkeit gering ist. [11]

Chemische Speicher Sind Speicher für Benzin und Diesel. Sie haben die Vorteile gegenüber den anderen Systemen, dass die Außenform frei bestimmbar ist, während des Betriebs wieder aufladbar sind und die „Betankung“ in kurzer Zeit möglich ist.

Elektrische Speicher Es wird zwischen drei Kategorien unterschieden: elektrochemische, induktive und elektrostatische Speicher. Elektrochemische und elektrostatische Speicher werden noch im späteren Kapitel (siehe *Kapitel 2.3.3*) detailliert besprochen. Induktive Speicher sind z. B. Supraleiter, die sich jedoch nicht zum Speichern von Energie im Fahrzeug eignen und deswegen auch nicht näher beschrieben werden sollen.

Thermische Speicher Zur Speicherung von thermischer Energie gibt es drei verschiedene Methoden. Eine stellen die sogenannten *sensiblen* oder *fühlbaren*

Speicher dar, die Energie durch Energieaufnahme und in weiterer Folge durch Temperaturänderung des Mediums, speichern. Eine weitere Methode ohne Temperaturänderung ist die Zuhilfenahme der Phasenwandlung des Speichermediums, auch Latentwärmespeicher genannt. Die letzte Methode stellt die *chemische Speicherung* dar. Durch Wärmezufuhr wird ein Medium verdampft und über eine Wärmauskoppelung (Wärmetauscher) erfolgt wieder eine Energieabgabe. [11]

Speichersysteme müssen jedoch, um sich als Energiespeicher für den Antrieb zu eignen, gewissen Anforderungen entsprechen. Im Nachfolgenden werden mögliche Ausprägungen und Kombinationen von Energiewandlern und Energiespeichern beschrieben.

2.1.1 Hybridfahrzeug

Bezugnehmend auf die Definition der UN aus dem Jahr 2003 ist das Hybridfahrzeug ein Fahrzeug mit mindestens zwei unterschiedlichen Energiewandlern und zwei unterschiedlichen Energiespeichern zum Zweck des Antriebes des Fahrzeuges [10]. Es kommen unterschiedliche Wandler, aber auch unterschiedliche Energiespeicher zum Einsatz. Es werden daher unterschiedliche Kombinationen vorgestellt. Der wohl bekannteste Vertreter von Hybridfahrzeugen ist der Toyota Hybrid Prius der seit dem Jahr 1997 auf dem Markt ist [10]. Der mittlerweile in dritter Generation produzierte Prius, verbindet einen Benzinmotor mit einem Elektromotor-Generator. Aber auch andere Speichersysteme werden von der Fahrzeugherstellern eingesetzt, wie Porsche das mit dem 911 GT3 R Hybrid mit einem Schwungradspeicher vorzeigt [12]. Neben den angesprochenen Unterschieden bei den Energiewandlern und den Energiespeichern unterscheiden sich auch die Grundstrukturen der Anordnungen von Elektromaschine, Generator, Traktionsbatterie, Getriebe und Verbrennungskraftmaschine. Eine Möglichkeit der Einteilung ist folglich hinsichtlich ihrer Struktur – Serieller, Parallel und Leistungsverzweigter Hybrid (siehe *Abbildung 2.1*).

Serieller Hybrid Die Antriebsleistung wird ausschließlich von der elektrischen Maschine zur Verfügung gestellt. Die Verbrennungskraftmaschine hat dabei die Aufgabe, den Generator anzutreiben. Der Vorteil dieser Struktur liegt in der Bereitstellung der gesamte Antriebsleistung durch den Elektromotor, sowie die Abdeckung von Spitzen durch die Batterie. Damit kann der Verbrennungsmotor in einem verbrauchsgünstigen Betriebspunkt betrieben werden. [13]

Parallel Hybrid Bei der zweiten Gruppe, dem Parallel Hybrid, kann ein direkter mechanischer Durchtrieb vom Verbrennungsmotor bis zum Rad realisiert werden. Der elektrische Antriebsstrang kann, je nach Bedarf, zugeschaltet werden. Die elektrische Maschine gibt die Leistung entweder durch Drehzahladdition, Momentenaddition oder Zugkraftaddition ab. Dieses Konzept bietet den Vorteil, dass es auch mit nur einer Elektromaschine realisiert werden kann und die Dimensionierung der Antriebskomponenten einfach ist, jedoch ist ein stationärer Betrieb der Verbrennungskraftmaschine nicht mehr möglich, was sich nachteilig auf Abgasemissionen und Energieverbrauch auswirkt. [10]

Leistungsverzweigter Hybrid Der leistungsverzweigte Hybrid stellt eine Sonderform dar, da er eine serielle und parallele Betriebsweise ermöglicht. Es werden zwei E-Maschinen benötigt, die mit einem Planetenradgetriebe gekoppelt sind. Im Zusammenspiel realisieren sie ein stufenloses Getriebe. Sie wirken in Momentenaddition auf den Antriebsstrang und bieten den Vorteil, dass die Komponenten entsprechend klein dimensioniert werden können. Zwischen parallelem und leistungsverzweigtem Hybrid sind kaum Verbrauchsvorteile festzustellen, jedoch zeichnet sich letztgenanntes durch einen hohen Fahrkomfort aus. [13]

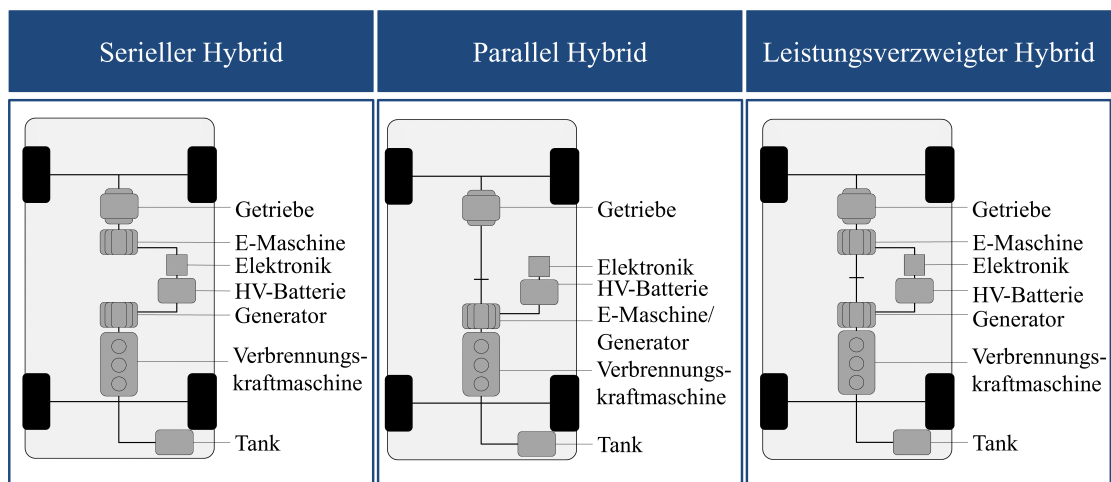


Abbildung 2.1: Strukturen der Hybridantriebe

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist der Hybridisierungsgrad: Micro-, Mild-, Full- und Plug-In Hybrid, die sich hinsichtlich ihrer Funktionen, Leistungen, Spannungsniveaus und ihrer Verbrauchseinsparungen (siehe *Abbildung 2.2*) unterscheiden.

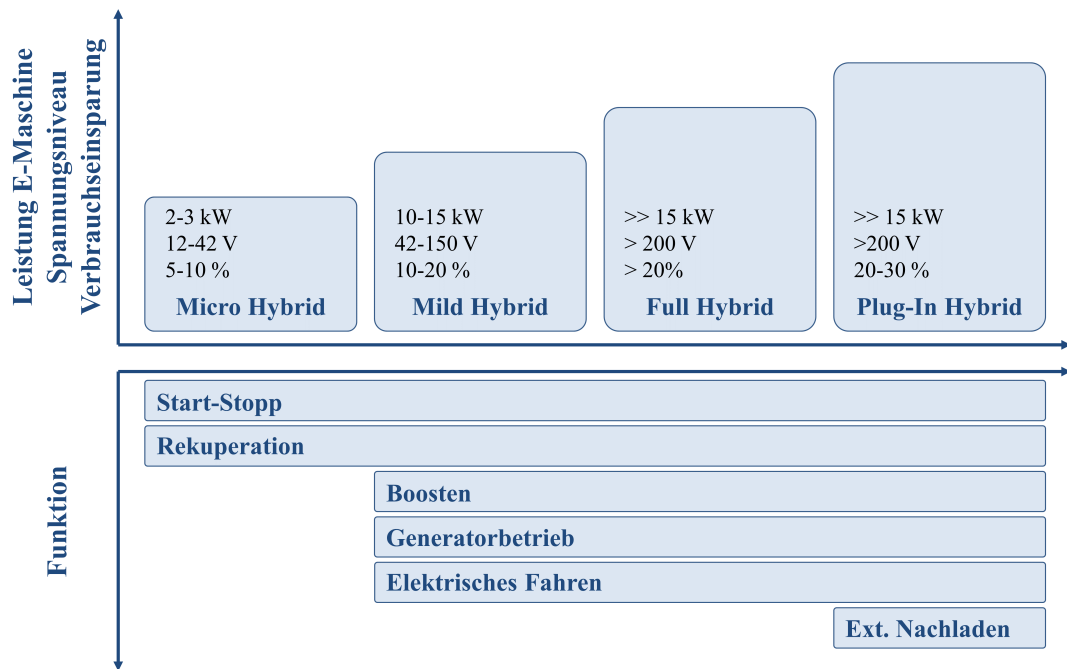


Abbildung 2.2: Übersicht der verschiedenen Hybridisierungsclassen und deren Nutzen [10], [13], [Eigene Darstellung]

Micro Hybrid Fahrzeug

Ist das Fahrzeug mit der geringsten technischen Modifikation bzw. Änderungen hinsichtlich der eingesetzten Antriebskomponenten des Antriebsstranges, im Vergleich zum Fahrzeug mit Verbrennungskraftmaschine. Zumeist wird lediglich der konventionelle Anlasser bzw. die Lichtmaschine gegen einen leistungsstärkeren oder einem Starter Generator ersetzt (siehe *Abbildung 2.3*). Zusätzlich wird die Kapazität der Batterie erhöht und auf die neuen Rahmenbedingungen (Start/Stop) ausgelegt.

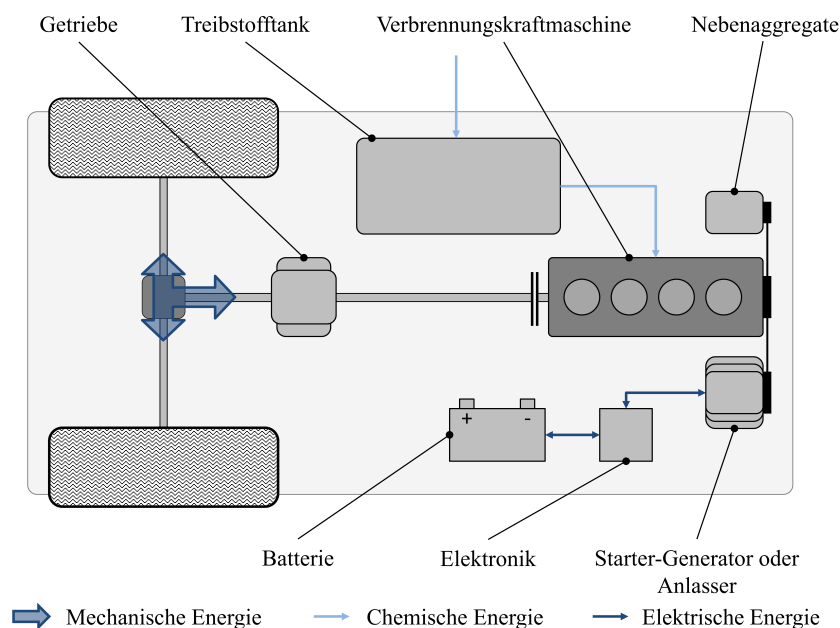


Abbildung 2.3: Anordnung der Komponenten beim Micro Hybrid Fahrzeug

Beim Stillstand des Fahrzeuges wird die Verbrennungskraftmaschine abgeschaltet. Beim erneuten Anfahren – Einkuppeln – wird der Motor, ohne zeitliche Verzögerung und für den Fahrer kaum spürbar, gestartet. Das Micro Hybrid Fahrzeug hat im Vergleich zu einem reinen Start/Stop-System die Möglichkeit, die Verzögerungsenergie teilweise zu rekuperieren. Dies setzt jedoch voraus, dass ein entsprechendes Energie-Management-System vorhanden ist. Dieses ist für den Ladezustand der Batterie zuständig und stellt sicher, dass immer ausreichend Energie für sicherheitsrelevante Systeme vorhanden ist. Es unterbindet auch eine Überbeanspruchung der Stromversorgung und eine komplette Entladung der Batterie. [10] Die Leistung der elektrischen Maschine beträgt meist unter 5 kW und die Bordspannung bleibt auf dem bekannten Niveau von 12 V. Es lassen sich mit dieser Variante Einsparungspotenziale von 5 bis 10 % realisieren. [13]

Mild Hybrid Fahrzeug

Es stellt die erste Erweiterungsstufe zum Micro Hybrid Fahrzeug dar und kann, neben dessen Funktionen – Start/Stop und Rekuperation –, die Verbrennungskraftmaschine durch Zuschalten eines Elektromotors – durch Erhöhung des Antriebsmoments – beim Anfahren unterstützen, dem sogenannten Boosten. In der Regel

befindet sich die Elektromaschine auf der Kurbelwelle zwischen Verbrennungskraftmaschine und Getriebe, wie man in *Abbildung 2.4*, sehen kann. Das Spannungsniveau liegt meist zwischen 42 und 150 V. Dies bringt die Vorteile, dass mit mehr Leistung operiert und in weiterer Folge die Effizienz beim Rekuperieren gesteigert werden kann, sowie eine Verkürzung der Startzeit. [10]

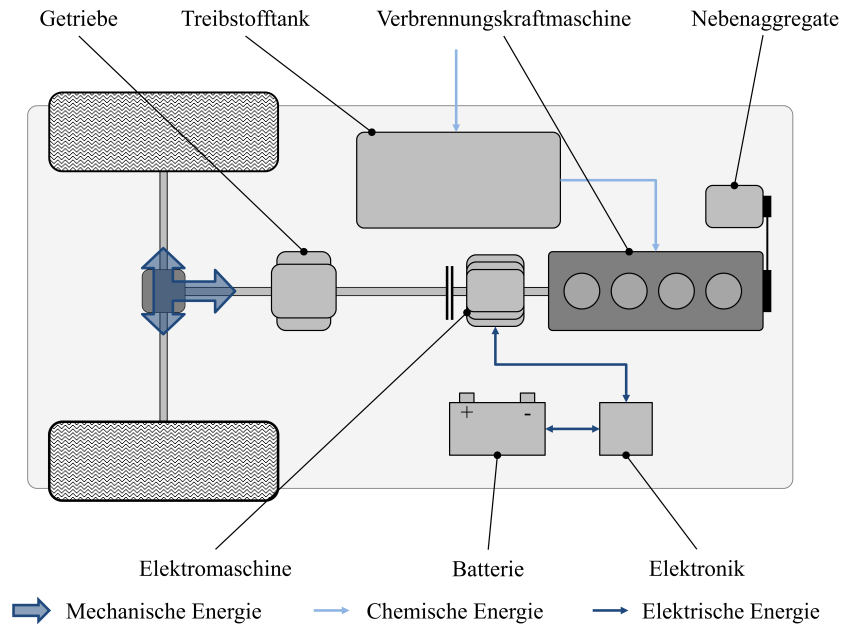


Abbildung 2.4: Anordnung der Komponenten beim Mild Hybrid Fahrzeug

Durch relativ einfache Methoden kann eine Kraftstoffeinsparung von 10-20 % realisiert werden. Es werden hier, im Vergleich zum Micro Hybrid Fahrzeug, eine größere elektrische Maschine, eine leistungsstärkere Leistungselektronik und eine fortgeschrittene Batterietechnologie eingesetzt. [13]

Full Hybrid Fahrzeug

Das sogenannte Full Hybrid Fahrzeug, auch Vollhybrid-Fahrzeug genannt, ermöglicht neben dem Fahren mit der Verbrennungskraftmaschine auch ein rein elektrisches Fahren bzw. ein kombiniertes Fahren. Im Antriebsstrang sind mehrere Modifikationen notwendig. So sind eine oder mehrere elektrische Maschinen, eine zusätzliche

Kupplung und eine Hochspannungsbatterie mit einem ausreichend großen Energieinhalt erforderlich. Zur Aufnahme der Energie, die beim Bremsen durch die E-Maschine entsteht, muss die Batterie eine hohe Maximalleistung aufweisen. Wie im *Kapitel 2.3.1* besprochen wird, haben Elektromotoren schon im niedrigen Drehzahlbereich ihr annähernd gesamtes Drehmoment. Dies führt dazu, dass gute Beschleunigungswerte bei maximaler Energieeffizienz gewährleistet werden können. [10]

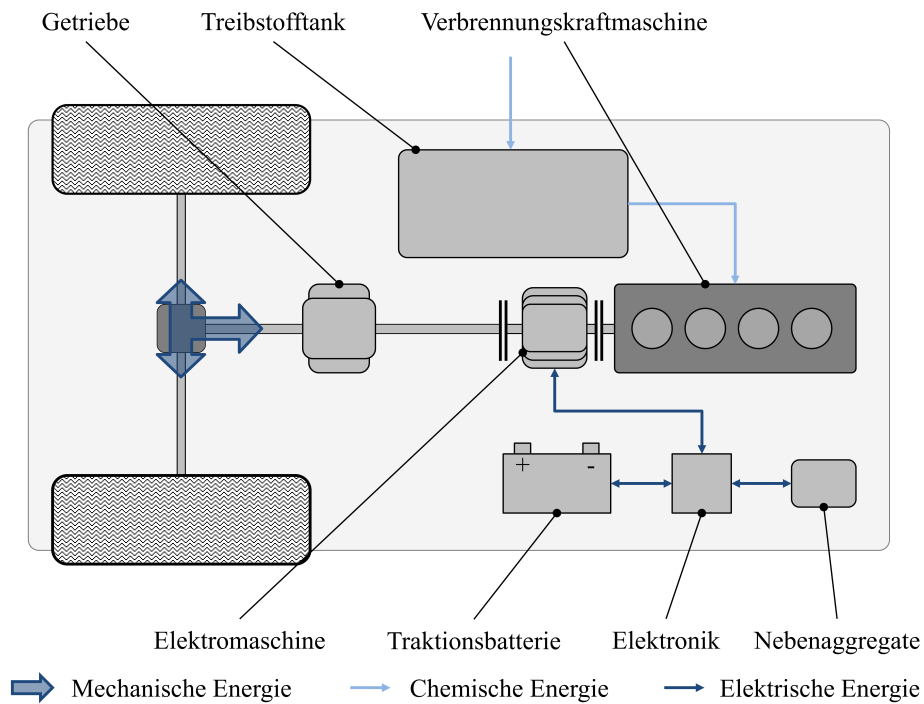


Abbildung 2.5: Anordnung der Komponenten beim Full Hybrid Fahrzeug

Bei diesem Konzept können Verbrauchseinsparungen von mehr als 20 % realisiert werden, im Vergleich zu einem Fahrzeug ohne Hybridantrieb, und durch elektrisches Fahren wird ein lokales emissionsfreies Fahren ermöglicht. [13]

Plug-In Hybrid Fahrzeug

Das Plug-In Hybrid Fahrzeug stellt eine Weiterentwicklung des Voll Hybrids dar. Das Konzept ermöglicht es, dass die Batterie nicht ausschließlich von der Verbrennungskraftmaschine oder durch Rekuperation geladen werden muss. Man kann die Speicher auch über eine externe Stromversorgung – eine Stromladestelle – laden.

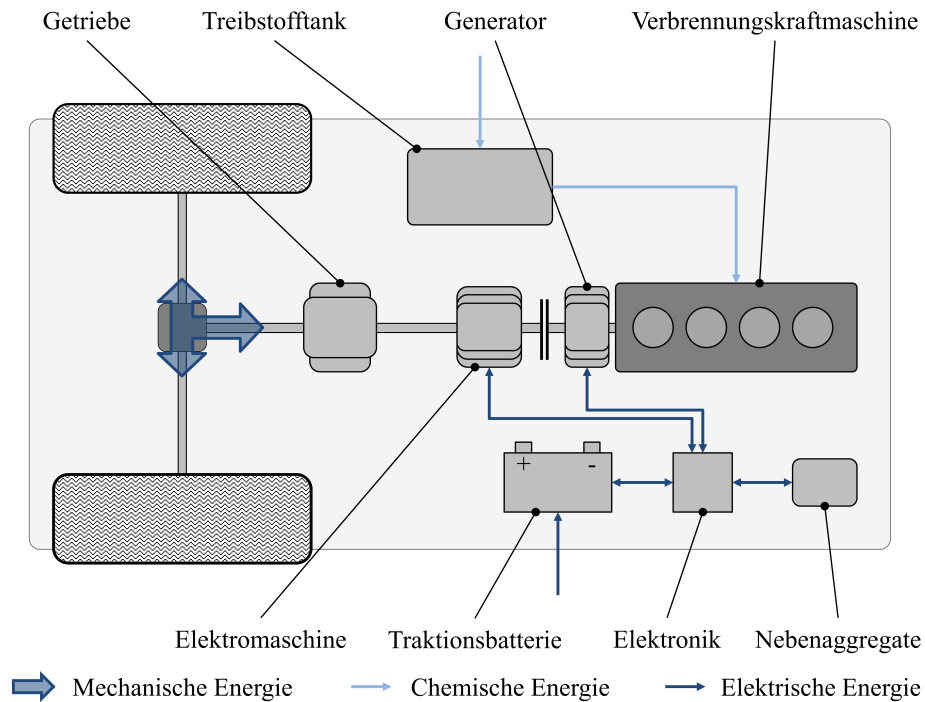


Abbildung 2.6: Anordnung der Komponenten beim Plug-In Hybrid Fahrzeug

Zumeist wird eine größere Traktionsbatterie verbaut, sodass kurze Strecken vollkommen elektrisch absolviert werden können. Die Verbrennungskraftmaschine ermöglicht es, dass man auch dann noch weiter fahren kann, wenn die Batterie leer ist oder wenn hohe Fahrgeschwindigkeiten, wie z. B. auf der Autobahn, erforderlich sind. [10] Da bestimmte Fahrstrecken rein elektrisch absolviert werden können, entstehen hier nur Emissionen, die durch die Erzeugung und Bereitstellung von Strom entstehen. Siehe dazu den Strommix der einzelnen Länder.¹ Beim Einsatz von regenerativ produziertem Strom können daher die Emissionen gegen Null reduziert werden.

2.1.2 Range-Extender-Fahrzeug

Dieses Konzept stellt einen weiteren Schritt in Richtung Elektrofahrzeug dar. Von der Auslegung der Komponenten entspricht es einem seriellen Hybrid (siehe *Ab-*

¹In Österreich wurden im Jahr 2010 rund 59 % des Strombedarfs durch Wasserkraft gedeckt und weitere 9 % aus erneuerbaren Energien [14]. So entstanden in Österreich im Jahr 2011 CO_2 -Emissionen von 192,5 g/kWh [15].

bildung 2.1), wobei die Kapazität der Batterie der eines Elektrofahrzeuges gleich kommt. Den Hauptantrieb stellt der Elektromotor dar. Die Verbrennungskraftmaschine dient dabei nur als „Range-Extender“ zur Reichweitenüberbrückung mit geringer Geschwindigkeit und zum Laden der Batterie. Die Verbrennungskraftmaschine ist relativ klein ausgeführt. In der Praxis wird sie nur benutzt, um jene Distanzen abzudecken, die nicht durch die Batteriekapazität abgedeckt werden.

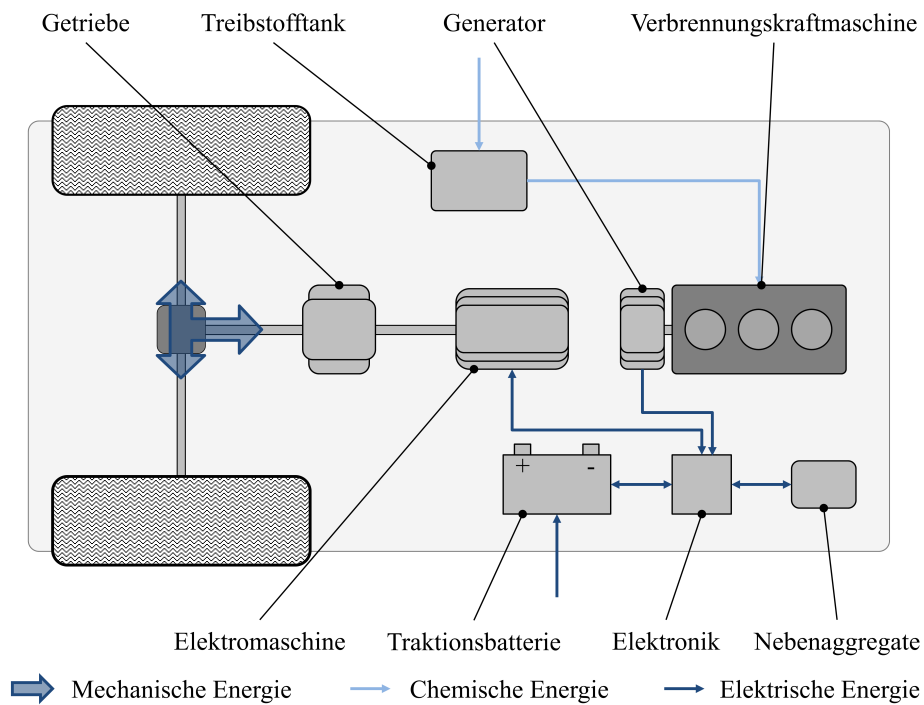


Abbildung 2.7: Anordnung der Komponenten beim Range-Extender-Fahrzeug

2.1.3 Elektrofahrzeug

Das Elektrofahrzeug hat als einzigen Energiewandler einen Elektromotor (siehe *Abbildung 2.8*), der die Energie der Traktionsbatterie in mechanische Energie umwandelt. Folglich muss die Energieversorgung durch eine entsprechende Batterie bereitgestellt werden. Die Batterie muss immer extern geladen werden, was den Vorteil bringt, dass lokal keine Emissionen entstehen. Wird zur Gänze elektrische Energie aus erneuerbaren Energien benutzt, kann ein emissionsfreies Fahren gewährleistet

werden. [16] Aufgrund der Momentencharakteristik der Elektromotoren – sie geben ihr Moment gleichmäßig über die Drehzahl ab – ist ein Getriebe nicht immer erforderlich [10].

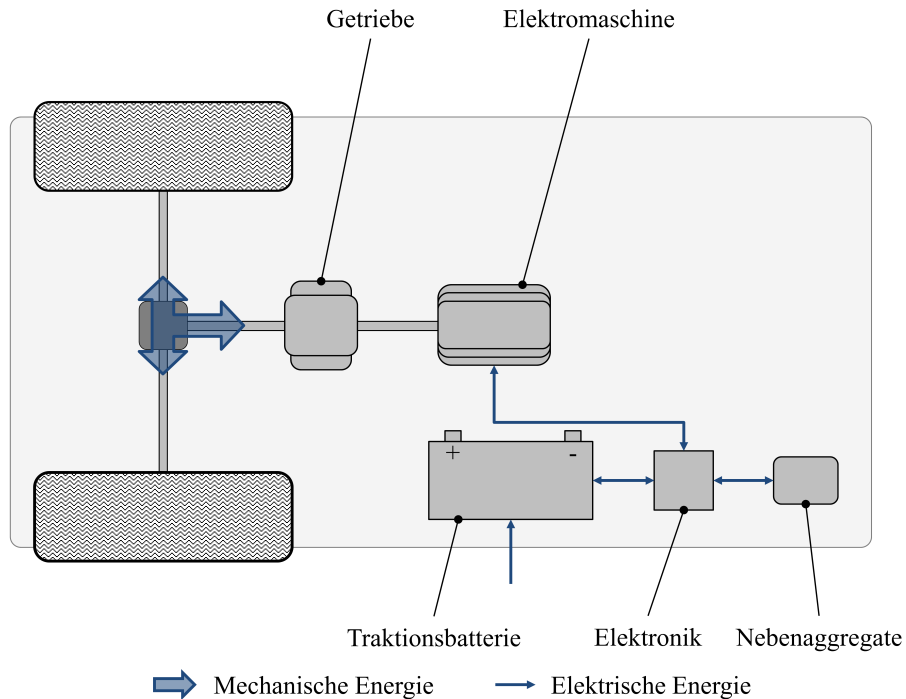


Abbildung 2.8: Anordnung der Komponenten beim Elektrofahrzeug

2.1.4 Brennstoffzellenfahrzeug

Brennstoffzellenfahrzeuge sind jene, die im Prinzip ebenfalls zwei Energiewandler (siehe *Abbildung 2.9*) besitzen, wobei ausschließlich die Elektromaschine dazu benutzt wird, mechanische Energie zu erzeugen. Der zweite Wandler, die Brennstoffzelle, ist ein elektrochemischer Energiewandler, der chemische Energie in elektrische Energie wandelt und sie im weiteren dem Antrieb zur Verfügung stellt. Es gilt als effizientes und sauberes Fahrzeugkonzept. Zur Zeit gilt die Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) als am technisch ausgereifteste, weshalb sie für die weiteren Betrachtungen und Berechnungen herangezogen wird. Das einzige Reaktionsprodukt des Prozesses der PEMFC ist Wasser bzw. Wasserstoff (siehe *Abschnitt 2.3.1*) [17].

Dieses Konzept bringt viele Vorteile mit sich, sodass zahlreiche Experten im Brennstoffzellenfahrzeug eine große Zukunft sehen. Hohe Reichweite, lokal emissionsfreier Betrieb, eine beinahe uneingeschränkte Verfügbarkeit des Rohstoffs Wasser und gute Fahrleistungen durch die Elektromaschine werden als ausschlaggebende Argumente genannt. Dem gegenüber stehen jedoch die Nachteile, dass eine entsprechende Infrastruktur mit Wasserstofftankstellen benötigt wird, die meist energieintensive Herstellung von Wasserstoff, sowie hohe Kosten für die Komponenten.²

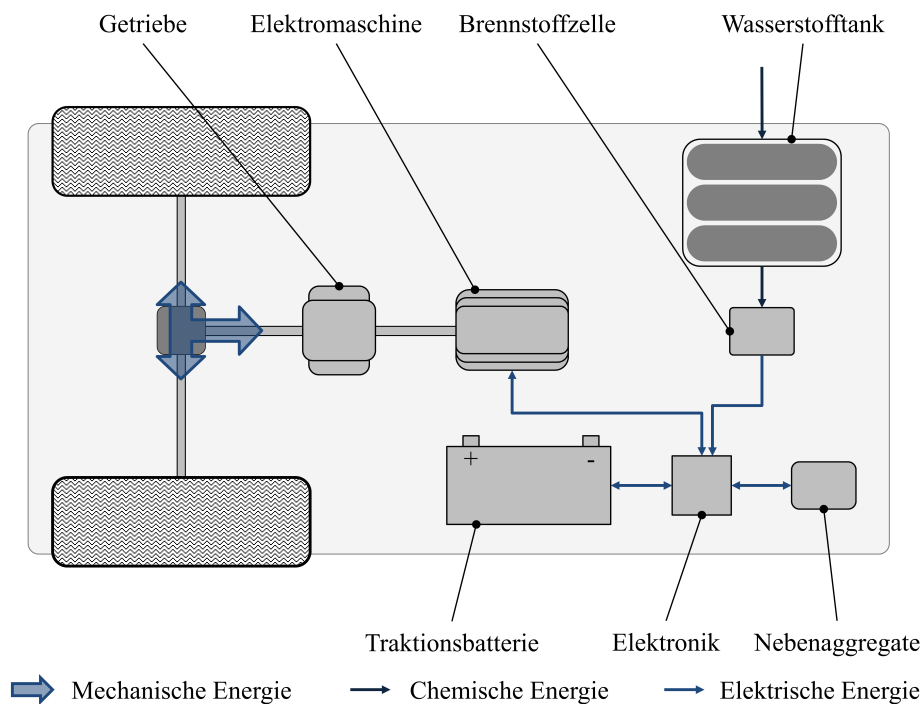


Abbildung 2.9: Anordnung der Komponenten beim Brennstoffzellenfahrzeug

2.2 Betrachtete Antriebskonzepte in den Modellen

Wie der vorige Abschnitt zeigt, unterscheiden sich die Antriebskonzepte durch die eingesetzten Komponenten. Diese und deren technologischen Eigenschaften wieder-

²Es gibt auch die Möglichkeit Wasserstoff direkt im Fahrzeug zu reformieren (siehe *Abschnitt 2.3.1*).

um sind maßgebend, um die eingesetzten Rohstoffe und Mengen zu ermitteln. Es werden daher in diesem Unterabschnitt die für die weiteren Untersuchungen notwendigen Antriebskonzepte definiert und im nächsten Abschnitt die Technologien besprochen. Dies ermöglicht in *Kapitel 7* die Beurteilung des Einsatzes möglicher Alternativen bzw. der Substitution einer Technologie.

Die zentrale Fragestellung (siehe *Abschnitt 1.1*) verlangt die Suche nach dem Einfluss der Rohstoffe auf PKW-Antriebskonzepte. Aus [18] wird ersichtlich, dass alle in *Abschnitt 2.1* beschriebenen Antriebskonzepte eingesetzt werden können. Auf die Konzipierung eines Fahrzeuges und eines Antriebs wirken viele verschiedene Kriterien ein. Aus der Sicht des Kunden sind jene wie Reichweite, Ladedauer und Preis ausschlaggebend für die Kaufbereitschaft, jedoch nicht auf die technische Machbarkeit, welche wiederum für die Fahrzeughersteller wesentlich ist. Sie werden ab dem *Kapitel 5* genauer beschrieben und in den Berechnungen berücksichtigt.

Die Größe des Fahrzeuges, wird wie in [19] beschrieben, über Segmente definiert und stellt eine direkte Einflussgröße auf die technologischen Eigenschaften der eingesetzten Baugruppen dar. Die Segmente haben das Ziel, eine statistische Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Nachdem in dieser Studie der Weltmarkt betrachtet wird, soll jenes Segment berücksichtigt werden, in dem weltweit die meisten Fahrzeuge verkauft werden. Diese sind VW Golf, Toyota Corolla und Ford Focus [20], die per Definition der Europäischen Union [21], alle dem Fahrzeugsegment „Small family car“ beziehungsweise „Kompaktwagen“ entsprechen. Die Auslegung der zu betrachtenden Fahrzeuge und deren Technologien orientieren sich daher an Fahrzeugen, die bereits am Markt im angesprochenen Segment erhältlich sind oder kurz davor stehen.

In *Abbildung 2.10* werden die für diese Arbeit definierten Antriebskonzepte angeführt. Die Antriebsleistung von 90 kW orientiert sich an der im Kompaktwagensegment üblichen Leistung. Das konventionelle Fahrzeug (CV) dient als Referenzfahrzeug und entspricht einem heute am Markt üblichen Fahrzeug, wie z. B. einem Golf. Es deckt auch die beiden kleinsten Hybridsierungsstufen (Micro und Mild Hybrid) ab. Berücksichtigt wird dabei auch, dass manche Nebenverbraucher, wie etwa die Klimaanlage, angepasst werden müssen. Das zweite Antriebskonzept ist das Plug-In Hybrid Fahrzeug (PHEV), welches zu Beginn des Betrachtungshorizonts ein Full Hybrid Fahrzeug ist. In der Literatur wird davon ausgegangen, dass die externe Ladefunktion innerhalb des Zeithorizonts bis 2030 Standard wird [22].

Die beiden weiteren Antriebskonzepte ähneln einander sehr, wobei das Range-Extender-Fahrzeug (REX) noch zwei Energiewandler hat. Der Verbrennungsmotor

im REX dient als „Notstromaggregat“ und gewährleistet lediglich, die Absolvierung weniger Kilometer bei verringerter Geschwindigkeit (siehe *Abschnitt 2.1.2*). Das Batterie Elektrische Fahrzeug (BEV) hat, bis auf den Verbrennungsmotor, die selbe Fahrzeugkonfiguration. Die Batteriekapazität von 23,4 kWh entspricht der durchschnittlichen Kapazität jener Fahrzeuge, die am Markt – Nissan Leaf, VW e-Golf – erhältlich sind [23].

Das letzte definierte Antriebskonzept ist das Brennstoffzellen Elektrische Fahrzeug (FCEV). Die Leistung der E-Maschine entspricht der der anderen Antriebskonzepte. Die Dimension der weiteren Komponenten, hinsichtlich der Leistung, orientieren sich an den Daten des Mercedes Benz B-Klasse, nachdem es ein bereits am Markt erhältliches Fahrzeug ist. Die Leistung der Brennstoffzelle liegt bei 95 kW, der Batteriekapazität 5 kWh und der Kapazität des Wasserstofftanks 5 kg bei 700 bar [24].

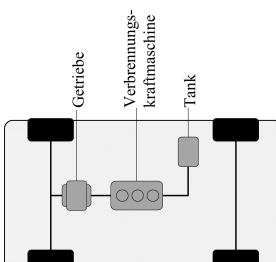
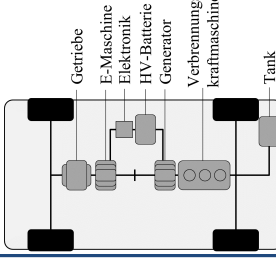
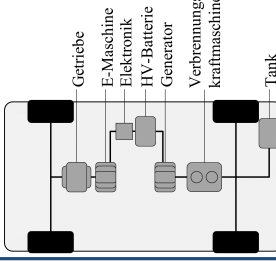
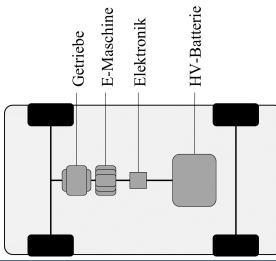
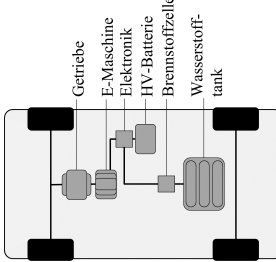
| | | | | | | | | | |
|---|---|--|---|--|--|--|---|--|---|
| Konventionelles Fahrzeug (CV) |  | Plug-In Hybrid Fahrzeug (PHEV) |  | Range-Extender Fahrzeug (REX) |  | Batterie Elektrisches Fahrzeug (BEV) |  | Brennstoffzellen Elektrisches Fahrzeug (FCEV) |  |
| Konfiguration Verbrennungsmotor 90 kW • Treibstofftank 60 l • Abgasnachbehandlung | | Konfiguration Verbrennungsmotor 60 kW • Treibstofftank 40 l • Abgasnachbehandlung • E-Maschine 50 kW • Batterie 11,2 kWh | | Konfiguration Verbrennungsmotor 15 kW • Treibstofftank 10 l • Abgasnachbehandlung • E-Maschine 90 kW • Batterie 23,4 kWh | | Konfiguration E-Maschine 90 kW • Batterie 23,4 kWh | | Konfiguration E-Maschine 90 kW • Brennstoffzelle 95 kW • Batterie 5 kWh • Wasserstoff 5 kg | |
| Eigenschaften Der Verbrennungsmotor ist der Hauptantrieb. Konzept deckt aber auch kleine Hybridisierungsstufen (Micro- und Mild Hybrid) ab. | | Eigenschaften Eine Übertragung des Drehmoments der Verbrennungskraftmaschine auf die Räder ist möglich. Deckt auch Full-Hybrid ab. | | Eigenschaften Eine direkte Übertragung des Drehmoments der Verbrennungskraftmaschine auf die Räder ist nicht möglich. | | Eigenschaften Nur stationäre Aufladung (E-Tankstelle) möglich. | | Eigenschaften Wasserstoff-Tankdruck von 700 bar | |
| Verbrennungskraftmaschine | | | | | | | | | |
| Elektrische Maschine | | | | | | | | | |

Abbildung 2.10: Zusammenfassung des definierten Fahrkonzeptportfolios

2.3 Technologien für die Elektrifizierung des Antriebsstranges

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die in dieser Arbeit unterschiedlichen Antriebskonzepte beschrieben wurden, werden in diesem Kapitel die Schlüsselkomponenten der Fahrzeuge vorgestellt. Neben den zur Zeit üblichen eingesetzten Technologien, werden auch mögliche technische Optimierungspotenziale, mögliche Substituierbarkeit und verschiedene Technologiepfade aufgezeigt.

2.3.1 Energiewandler

Für die Fahrzeuge ist der eingesetzte Energiewandler ein wesentlicher Bestandteil. So werden bei den in dieser Arbeit berücksichtigten Hybridkonzepten immer eine Verbrennungskraftmaschine – Wandlung von chemischer Energie (in Form von Benzin und Diesel) in mechanische Energie – in Kombination mit einem Elektromotor – elektrische in mechanische Energie – eingesetzt. Abschließend wird die Brennstoffzelle besprochen, die chemische Energie (Wasserstoff) in elektrische Energie wandelt.

Verbrennungskraftmaschine

Die Verbrennungskraftmaschine, betrieben mit Benzin, Diesel oder Gas, ist derzeit die am häufigsten benutzte Antriebsmaschine bei Personenkraftwagen. In der Literatur wird davon ausgegangen, dass in Zukunft (bis 2030) noch annähernd alle Personenkraftwagen mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet sein werden [25]. Wie in *Kapitel 2.1* beschrieben, ist der Verbrennungsmotor jener Energiewandler, auf dem in dieser Arbeit betrachteten Hybride Antriebskonzepte basieren. Womit eine Optimierung des Verbrennungsmotors wesentlich ist. Zur Vollständigkeit werden daher die Optimierungspotenziale zusammengefasst.

Aufladung und Downsizing Downsizing bedeutet, die Betriebspunkte – durch Änderung der Zylinderzahl oder Hubraumgröße – näher an den Bereich des geringsten Verbrauches zu legen. Bei der Aufladung kommt es durch eine Erhöhung des Fülldruckes im Brennraum zu einer Steigerung der Leistung. [13]

Benzindirekteinspritzung Bei der Direkteinspritzung von Benzin wird der Kraftstoff unverdampft und direkt in die Brennkammer eingespritzt. Die Einspritzdüse ist dabei nicht im Lufteinlass. [13]

Variabler Ventiltrieb Durch Veränderung des Öffnungs- und Schließzeitpunktes und der Hublänge des Ventiltriebes kommt es zu einer Reduktion des Verbrauches. [13]

Neue Brennverfahren Darunter versteht man das Verbinden des Brennverfahrens eines Otto- und eines Dieselmotors. Das ottomotorische Prinzip übernimmt den Homogenbetrieb – frühe Einspritzung und äußere Gemischbildung – und durch Kompression kommt es zur Zündung, wie beim dieselmotorischen Prinzip. [13]

Variable Kompression Der thermische Wirkungsgrad ist abhängig vom Verdichtungsverhältnis. Der Wirkungsgrad steigt bei einem höheren Verdichtungsverhältnis. Beim Ottomotor steigt jedoch im Volllastbereich die Klopfneigung. [13]

Zylinderabschaltung Wie beim Downsizing soll auch bei der Zylinderabschaltung durch Verschiebung der Betriebspunkte eine Verminderung des Verbrauches erreicht werden. So kann durch Abschaltung einzelner Zylinder der Betriebspunkt vom Teillastbereich in den Lastbereich mit besseren Verbrauchswerten verschoben werden. [13]

Abgasenergierückführung Bei der Rückführung der Abgasenergie gibt es verschiedene Ansätze. Die erste Variante ist die Erzeugung von elektrischem Strom mittels Thermoelementen (Seebeck-Effekt). Eine weitere Variante ist der Turbostreamer, der einen Kühlkreislauf, ähnlich einer Dampfmaschine, erwärmt und diese Energie wieder in einer Expansionsturbine frei gibt. Die erzeugte Leistung wird dann anschließend direkt auf die Kurbelwelle übertragen. [13]

Elektromaschine

Die Elektromaschine ist der zentrale Bestandteil eines REX, BEV und FCEV, der allein für den Antrieb des Fahrzeuges verantwortlich ist. Ein Elektromotor treibt auch das PHEV an, er hat hier jedoch nur eine unterstützende Aufgabe und ist nicht allein für den Antrieb zuständig. Im Vergleich zur Verbrennungskraftmaschine kann er auch im 4-Quadranten-Betrieb betrieben werden, was bedeutet, dass er auch als Bremse und als Generator – um elektrische Energie zu rekuperieren – betrieben werden kann. Für den Betrieb bzw. die Steuerung des Motors sind eine geeignete Leistungselektronik und Steuerelektronik notwendig. Beim konzeptionellen Aufbau

des Antriebsstranges unterscheidet man zwischen Zentralmotor und Radnabenmotor.

Zentralmotor Der Motor hat dieselbe Lage wie die Verbrennungskraftmaschine im konventionellen Fahrzeug. Aufgrund der bereits erwähnten guten Momentencharakteristik des Motors entfällt zwar das Getriebe, es kann aber nicht auf ein Achsgetriebe oder eine Antriebswelle verzichtet werden.

Radnabenmotor Bei der Ausführung des Antriebes als Radnabenmotor ist die Lage der Elektromaschine direkt in der Felge. Zumeist ist nicht nur der Antrieb im Rad integriert, sondern auch Baugruppen wie Federung, Dämpfung und Bremsen. Die großen ungefederten Massen stellen aber ein großes Problem dar.

Die Elektromaschine besteht aus einem rotierenden Teil – Läufer oder Rotor – und einem feststehenden Teil – Ständer oder Stator. Dem Rotor wird die elektrische Energie zugeführt, im Fall des generatorischen Betriebes abgeführt und im Stator die mechanische Leistung ab- bzw. zugeführt. Dies variiert jedoch nach Bauart und Anordnung der Bauteile in den Motoren. Der einfache Aufbau bringt die Vorteile, dass einerseits die Herstellung sehr günstig ist und andererseits der Wartungsaufwand gegenüber einer Verbrennungskraftmaschine geringer ist.

Zur Bereitstellung der notwendigen Antriebsleistung werden verschiedene Traktionsmaschinen eingesetzt. Eine Zusammenfassung bzw. ein Vergleich der einzelnen Elektromaschinen wird in *Tabelle 2.1* angeführt.

Gleichstrommaschinen (GM) Sie werden hauptsächlich für kleine Antriebsleistungen, wie sie bei Hybridantrieben notwendig sind, eingesetzt. Der Stator besteht aus einem Ring, der in der Innenseite die Hauptpole aufnimmt. Dazwischen dreht sich der Rotor mit der Ankerwicklung. Der elektrische Leiter baut zwischen der Erregerwicklung ein Magnetfeld auf, das den Läufer in Bewegung setzt. [10]

Asynchronmaschine Besitzt einen Läufer (Rotor) aus Blech. Das erwünschte Moment entsteht durch den Schlupf, wobei bei zunehmender Belastung dieser zunimmt und in weiterer Folge bei geringerer Motordrehzahl mehr Moment entsteht. Die Steuerung der Drehzahl kann entweder über eine Veränderung des Statorfeldes, der Polpaarzahl oder des Schlupfs erfolgen. [10]

Synchronmaschine Der grundsätzliche Aufbau der Synchronmaschine ist dem der Asynchronmaschine sehr ähnlich. Der Rotor kann jedoch entweder mit einem Dauermagneten (permanent erregte Synchronmaschine) oder einem, über Gleichstrom erregten Polarrad, magnetisiert werden (fremderregte Synchronmaschine). Die permanenterregte Synchronmaschine ist die im Moment am häufigsten eingesetzte Antriebsmaschine bei Hybridfahrzeugen. Sie liefert hohe Wirkungsgrade (siehe *Abbildung 2.1*) bei einer vergleichsweise kleinen Bauform, sie ist jedoch teurer als eine vergleichbare Asynchronmaschine. Die fremderregte Maschine bietet den Vorteil, gänzlich ohne Magnetmaterialien auszukommen, die Übertragung und die notwendige Leistungselektronik sind jedoch noch nicht technisch ausgereift. [10]

Geschaltete Reluktanzmaschine Die geschaltete Reluktanzmaschine (SR-Maschine) zählt ebenfalls zu den Synchronmaschinen. Die Besonderheit dieser Maschine sind die Zähne, mit denen, sowohl Ständer, als auch Läufer ausgestattet sind. Es sind lediglich Wicklungen auf dem Stator. Der Rotor kommt komplett ohne Wicklungen, Kurzschlusskäfig oder Dauermagneten aus. Er besitzt ein hohes Leistungsgewicht, einen hohen Wirkungsgrad, einen kostengünstigen Aufbau und ein gutes Dauerdrehmoment. Andererseits aber auch ein schlechtes Beschleunigungsvermögen und eine sehr aufwendige Leistungselektronik. [10], [26]

Transversalflussmaschine (TFM) Sie unterscheidet sich durch die Führung des magnetischen Flusses, die den magnetischen Fluss quer zur Bewegungsrichtung hat. Dies erreicht man durch koaxiale Ringspulen. Im Vergleich zu den anderen E-Maschinen hat die TFM eine um 3,5-fache höhere Leistungsdichte und einen höheren Wirkungsgrad. Das System und dessen Aufbau ist sehr komplex, dass zu höheren Kosten führen kann. [26]

Tabelle 2.1: Übersicht der Leistungsmerkmale elektrischer Maschinen [10], [27], [28], [29]

| | Gleichstrom- maschine | Synchronmaschine fremd | Synchronmaschine permanent | Asynchron- maschine | Transversal- flussmaschine | SR- Maschine |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------------|-----------------|
| Höchstdrehzahl [U/min] | 7.000 | >10.000 | >10.000 | >10.000 | >10.000 | >10.000 |
| Spez. Dauermoment [Nm/kg] | 0,7 | 0,6-0,75 | 0,95-1,72 | 0,6-08 | | 0,8-1,1 |
| Max. Wirkungsgrad [] | 0,82-0,88 | 0,87-0,92 | 0,87-0,94 | 0,89-0,93 | | 0,2-0,62 |
| Leistungsdichte | - | o | ++ | + | + | + |
| Wirkungsgrad [] | - | + | ++ | o | + | + |
| Regel-/ Steuerbarkeit | ++ | + | + | o | + | + |
| Geräusch | - | | ++ | + | | - |
| Therm. Überlastfähigkeit | - | + | o | ++ | | ++ |
| Kosten der Maschine | - | - | - | + | - | ++ |
| Kosten des Gesamtsystems | + | o | o | ++ | - | + |
| Stand der Technik | ++ | - | ++ | ++ | - | o |
| Sicherheit | - | ++ | - | ++ | + | ++ |

- + Positiv Eigenschaften im Vergleich mit den anderen Batterietypen
- o Ähnliche Eigenschaften im Vergleich mit den anderen Batterietypen
- Negative Eigenschaften im Vergleich mit den anderen Batterietypen

Brennstoffzelle

Die Nutzung von Wasserstoff kann auf zwei Arten realisiert werden. Die direkte Nutzung in einer Verbrennungskraftmaschine ist eine Möglichkeit. Wasserstoff wird dazu zunächst in Wärme umgewandelt und erst in Folge in mechanische Energie. Es kann so nur maximal der Carnotsche Wirkungsgrad³ erreicht werden.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Konvertierung der chemisch gespeicherten Energie in elektrische Energie in einer Brennstoffzelle dar. In *Abbildung 2.11* sind der schematische Aufbau und die grundsätzliche Funktionsweise einer Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) dargestellt. Die beiden porösen Elektroden werden durch eine Protonen leitende Elektrolyt-Membran getrennt. Der Anode wird der Energieträger Wasserstoff zugeführt, wo es oxidiert und Elektronen entstehen. Der Kathode wird Sauerstoff als Oxidationsstoff zugeführt, das unter zuhelfenahme von Elektronen zu Wasser reduziert wird.

Durch den Betrieb der Brennstoffzelle mit reinem Sauerstoff, sind Wirkungsgrade von 80 bis 95 % realisierbar. In der Praxis wird meistens Luft benutzt, was dazu führt, dass der realisierbare Wirkungsgrad darunter liegt. Eine einzige Zelle produziert unter durchschnittlichen Bedingungen eine Spannung von in etwa 0,7 V, weshalb eine Brennstoffzellen-Stack immer aus mehreren in Serie geschalteten Einheiten besteht. In der Praxis können diese Stacks nicht mit reinem Sauerstoff betrieben werden, sondern mit Luft aus der Umgebung. Es muss daher, in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur, die Luft vorgewärmt oder komprimiert werden. Der Wasserstoff kann entweder in Tanks (siehe *Kapitel 2.3.3*) mitgeführt oder durch Reformieren von Alkoholen (z. B. Methanol) oder Kohlenwasserstoffe (z. B. Methan) direkt am Fahrzeug hergestellt werden. Dies gilt jedoch als sehr aufwendig.

³Ist der theoretisch höchste Wirkungsgrad der bei der Umwandlung von einer Energie in eine andere Energie (z. B. Wärmeenergie in mechanische Energie) erreicht werden kann.

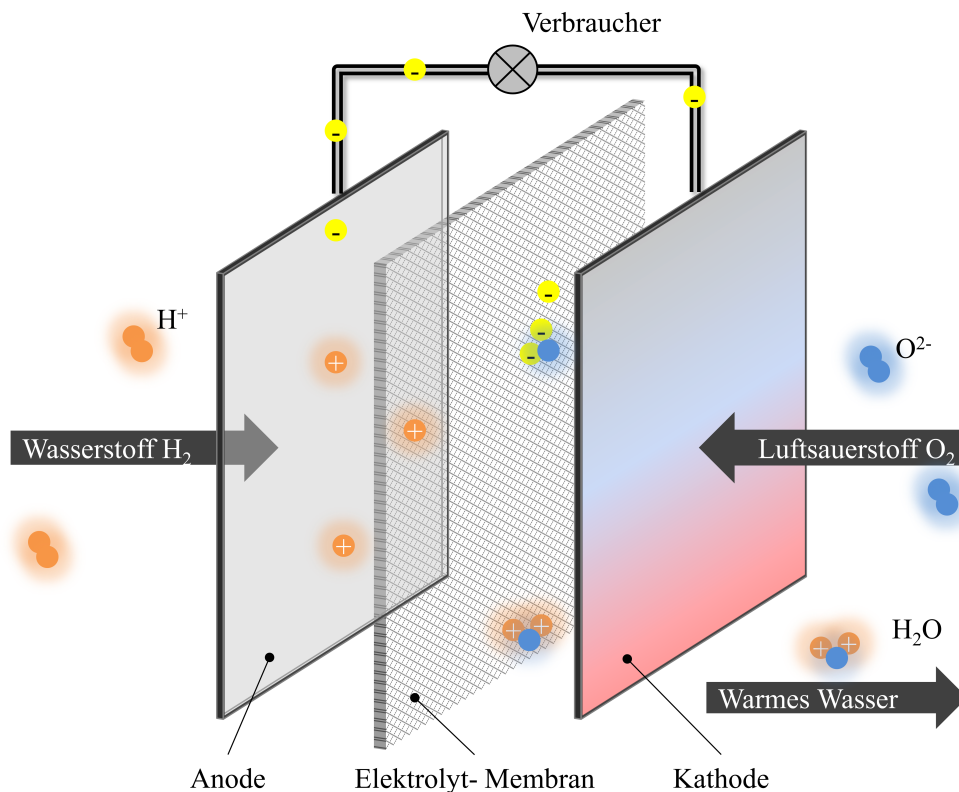


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung des Aufbaus und der Funktionsweise einer PEMFC [13], [Eigene Darstellung]

Die Systeme werden im Allgemeinen hinsichtlich ihres eingesetzten Elektrolyts klassifiziert und benannt, mit der Ausnahme der DMFC, die nach dem eingesetzten Kraftstoff identifiziert wird (siehe *Tabelle 2.2*). [30]

Alkaline Fuel Cells Die AFC sind Niedertemperatur-Brennstoffzellen. Als Elektrolyt wird zumeist eine wässrige Kaliumhydroxid-Lösung eingesetzt und als Brennstoff dient reiner Wasserstoff. Nachdem der CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre zu hoch ist, muss der Kathode reiner Sauerstoff zugeführt werden. Die Brennstoffzelle hat eine Leistung von 10 kW bis 100 kW, ist sehr einfach und robust aufgebaut und erreicht als System einen guten Wirkungsgrade von etwa 60 %. [31]

Proton Exchange Membrane Fuel Cells Die PEMFC zählt ebenfalls zu den Niedertemperatur-Brennstoffzellen. Sie benutzt eine protonenleitende Polymermembran als Elektrolyt. Die Elektrode besteht meist aus Graphit und wird mit Platin als Katalysator beschichtet. Im Vergleich zu den anderen

Brennstoffzellen gilt PEMFC als technisch ausgereift, ist jedoch sehr teuer. [32] Man unterscheidet zwischen einer NT-PEMFC (Low-Temperature-Proton-Exchange-Membrane Fuel Cell) und einer HT-PEMFC (High-Temperature-Proton-Exchange-Membrane Fuel Cell). Grundsätzlich sind die beiden Brennstoffzellen einander ähnlich, wobei die HT-PEMFC eine neuartige und einfach herzustellende Membran besitzt. [31]

Direct Methanol Fuel Cells Eine Form der PEMFC stellt die DMFC dar, wobei der Anode flüssiges oder dampfförmiges Methanol zugeführt wird. Der Vorteil ist der einfache Aufbau, eine hohe Lebensdauer und die einfache Betankung. Sie weist jedoch nur einen geringen Wirkungsgrad auf und als Abgas entsteht CO_2 . Unter anderem wird sie wegen der geringen Leistung von bis zu 1 kW meist nur bei Kleingeräten eingesetzt. [31]

Phosphoric Acid Fuel Cells Die PAFC gehört heutzutage zu den am weitest entwickelten Brennstoffzellen. Sie findet oftmals Einsatz bei stationären Anwendungen, wie z. B. als Notstromaggregat. Ihre größten Vorteile gegenüber den anderen Brennstoffzellen, sind ihr einfacher Aufbau, ihre thermische, chemische und elektrochemische Stabilität und ihre geringe Arbeitstemperatur. Zum Beschichten der Anode wird Platin eingesetzt. [32]

Molten Carbonate Fuel Cells Die MCFC ist eine Hochtemperatur-Brennstoffzelle und arbeitet in einem Bereich von etwa 600-650 °C. Das Elektrolyt besteht aus Lithium- und Kaliumcarbonat, das auf einer Matrix aus Lithiumaluminat fixiert wird. Als Brennstoff dient ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Aufgrund der hohen Betriebstemperatur sind keine Edelmetalle vonnöten, als Elektrodenmaterial kommt Nickel zum Einsatz. Es können Gesamtwirkungsgrade von bis zu 90 % realisiert werden und Leistungen bis zu 100.000 kW. Die Herstellungskosten sind zwar sehr niedrig, jedoch verlangen die hohen Arbeitstemperaturen verstärkte Sicherheitsmaßnahmen. [31]

Solid Oxide Fuel Cells Neben der DMFC ist auch die SOFC eine Hochtemperatur-Brennstoffzelle. Im Gegensatz zu den anderen Brennstoffzellen besteht das Elektrolytmaterial aus einem festen keramischen Werkstoff. [32] Die Kathode ist aus einem ionen- und elektronenleitfähigen keramischen Material, wie Lanthan-Strontium-Manganoxid, aufgebaut und die Anode meist aus einem keramisch-metallischen Cermet-Werkstoff. Mithilfe eines Katalysators, wie Ruthenium und Cer, kann der Brennstoff direkt im System reformiert werden.

Zum Starten der chemischen Reaktionen in der Brennstoffzelle ist eine externe Heizung notwendig. [31]

Tabelle 2.2: Übersicht der Brennstoffzellentypen [33], [34]

| | Elektrolyt | Elektroden (Anode/ Kathode) | Arbeits- temperatur | El. Wirkungsgrad [%] | Besonderheit |
|--|--|--|--------------------------------|--------------------------------|--|
| Alkaline Fuel Cell (AFC) | Wässrige Kalilauge | Ni/Ag (Pt/Pt) | 60-200°C | Zelle: 60-70, System: 60 | Hoher Wirkungsgrad, aber nur für reinen Wasserstoff und Sauerstoff geeignet. |
| Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) | Protonen- leitende Polymer- membran | Pt/Pt | 20-120°C | Zelle: 50-70, System: 30-50 | Sehr flexibles Betriebsverhalten, hohe Leistungsdichte |
| Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) | Protonen- leitende Polymer- membran | | 90-120°C | Zelle: 20-30 | Direkte Umwandlung von Methanol, niedriger Wirkungsgrad |
| Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) | Phosphor- säure | Pt/Pt | 160-220°C | Zelle: 55, System: 40 | Begrenzter Wirkungsgrad, Korrosionsprobleme |
| Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) | Geschmolzene Karbonate | Ni/NiO | 600-650°C | Zelle: 55, System: 50 | Komplexe Prozessführung, Korrosionsprobleme |
| Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) | Festes Zirkonoxid | SrLaMn ₃ | 850-1000°C | Zelle: 60-65, System: 55-60 | Direkte Verstromung von Erdgas, Keramiktechnologie (hohe Temperaturen) |

2.3.2 Abgasnachbehandlung

Durch den Einsatz moderner Abgasnachbehandlungstechniken können die drei Hauptkomponenten – Kohlenstoffmonoxid CO , Kohlenstoffdioxid CO_2 , Stickoxide NO_x - des Abgases herausgefiltert werden. Bei der ottomotorischen Verbrennung entstehen noch Kohlenwasserstoffe und bei der dieselmotorischen Verbrennung Feinstaubpartikel. Alle Maßnahmen, die zu einer Reduktion des Treibstoffverbrauchs führen und den Schadstoffausstoß reduzieren, kommen auch bei Hybridfahrzeugen zum Einsatz.

Kohlendioxid wirkt direkt als Treibhausgas auf den Klimawandel und ist proportional zum Verbrauch des Kraftstoffes. Der Ausstoß kann daher nur durch eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs reduziert werden. Alle weiteren Emissionen können durch die angeführten Abgasnachbehandlungstechniken reduziert werden. [13] Die durchschnittlich eingesetzte Edelmetallmenge pro Katalysator liegt bei 1,5 bis 3 Gramm. Die Menge hängt von den katalytischen Eigenschaften der eingesetzten Metalle ab. [35]

Drei-Wege-Katalysator (TWC) Dieser wird eingesetzt zur Verringerung von Kohlenmonoxid-, Kohlenwasserstoff- und Stickoxidemissionen. Die Grundstruktur des Katalysators ist eine wabenförmige Struktur aus Keramiken und Metallen, auf welche eine Trägerschicht aufoxidiert wird. Die Trägerschicht aus Aluminiumoxid beinhaltet katalytisch aktive Metalle, z. B. Rhodium, Platin oder Palladium, die chemische Reaktionen bewirken. Der Wirkungsgrad der Konvertierung beträgt bis zu 90 %. [13]

NO_x -Speicher-Katalysator (NSK) Dieser Katalysator hat als Ziel, die Stickoxide zu dezimieren und stellt zur Zeit in dieser Kategorie den Katalysator mit der größten Entwicklungstiefe dar. Die Reduktion geschieht in einem zweistufigen Verfahren, wobei in der ersten Stufe die Stickoxide eingelagert werden und in der zweiten Stufe sie zu Stickstoff reduziert werden. Als Beschichtungsmetall wird Platin eingesetzt. [13]

SCR-Katalysator (SCR) Auch dieser Katalysator hat die Aufgabe, Stickoxide zu mindern. Durch eine Hydrolysereaktion wird aus einem eingespritzten Harnstoff Ammoniak und CO_2 gebildet. In einer weiteren Stufe reagiert das Ammoniak mit den Stickoxiden im Katalysator zu Stickstoff und Wasser. Es werden keine Edelmetalle benötigt. [13]

Rußpartikelfilter (PF) Im Partikelfilter kommt es zur Reduktion von Feinstaubpartikeln. Auch hier wird ein zweistufiges Verfahren angewandt. In der ersten

Stufe wird das Abgas vom Rußpartikel getrennt und anschließend in der zweiten Stufe zu CO_2 verbrannt. Die Verbrennung erfolgt automatisch, da es zu einem Anstieg der Temperatur kommt, wenn der Gegendruck des Filters einen gewissen Grenzwert überschreitet. [13]

2.3.3 Energiespeicher

Wie schon zuvor besprochen, dienen sie zur Speicherung von Energie für die spätere Nutzung. Die Wahl des Speichers hängt maßgeblich von der zu speichernden Energie ab, die wiederum vom eingesetzten Energiewandler bestimmt wird.

Traktionsbatterie

Die Traktionsbatterie ist die ausschlaggebende Speicherkomponente bei Hybrid-, Range-Extender- und Elektrofahrzeugen. Die Wahl der geeigneten Batterie hängt von ihren Eigenschaften, wie zum Beispiel der spezifischen Energie, Leistungsdichte, Zyklenlebensdauer, etc. und deren Anforderung durch die Fahrzeugantriebe ab. [10]

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Batteriesysteme besprochen, deren Potenzial zum Einsatz im Fahrzeug analysiert und die unterschiedlichen Systeme untereinander verglichen. Es handelt sich durchwegs um wiederaufladbare Systeme, auch Sekundärsysteme genannt. Der grundsätzliche Aufbau ist bei den Systemen die elektrochemische bzw. galvanische Zelle (siehe *Abbildung 2.12*), in der die Umwandlung bzw. die Speicherung von chemischer Energie in elektrische Energie stattfindet.

Blei-Batterie (Pb/PbO₂) Die Bleibatterie ist die heutzutage gängigste Starterbatterie. Auf der positiven Elektrode wird Bleidioxid eingesetzt und auf der negativen ein Bleimaterial, das sich bei der Entladung zu Bleisulfat umwandelt. Auf dem Markt sind drei Typen erhältlich: Pb-Flüssigsäure-Batterien, Pb-Gel-Batterien und Pb-AGM-Batterien⁴, wobei die Ausführung mit Flüssigsäure bei heutigen Starterbatterien eingesetzt wird. Um eine höhere Zyklenfestigkeit zu erhalten, wird ein Elektrolyt in Form eines Gels eingesetzt, was unter anderen den Vorteil einer höheren Sicherheit und Haltbarkeit bringt. Blei-Batterien können nur bedingt die Anforderungen hinsichtlich Energiedurchsatz und Zyklenfestigkeit bei Hybridfahrzeugen erfüllen. Aufgrund des geringen Materialeinsatzes ist die Batterie sehr günstig. [10]

⁴AGM: Adsorbent Glass Mat

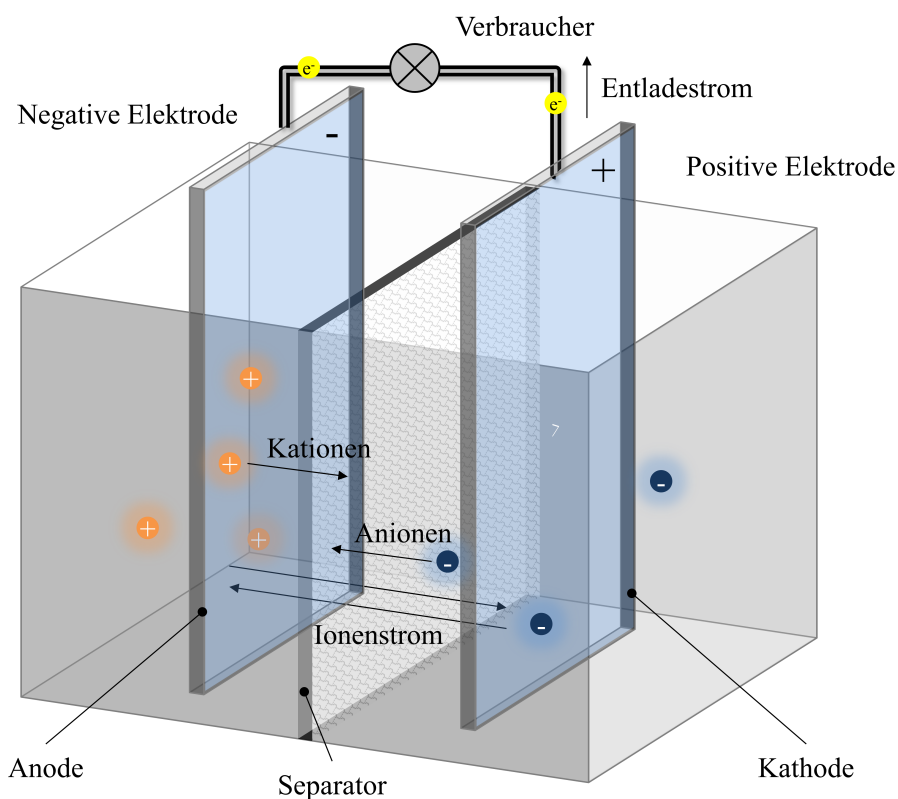


Abbildung 2.12: Aufbau und Abläufe einer Batterie [Eigene Darstellung]

Nickel-Cadmium-Batterie (NiCd-Batterie) Im geladenen Zustand sind die Minuspol-Platten mit fein verteiltem Cadmium beladen und der Pluspol mit Nickel(III)-oxidhydroxid, woher auch der Name kommt. Als Elektrolyt wird eine Kaliumhydroxid-Lösung eingesetzt. Aus technischen und Umweltverträglichkeitsgründen hat sich der Typ in Fahrzeugen nie durchgesetzt. [10]

Nickel-Metallhydrid-Batterie (NiMH-Batterie) Sie gilt als Weiterentwicklung der NiCd-Batterie. Die negative Elektrode besteht aus einer wasserstoffspeichernden Legierung (Metallhydrid). Als Elektrolyt wird eine stark konzentrierte Lauge eingesetzt und zur Separation ein Polymerfaservlies auf Polyethylen/Polypropylen-Basis. Die NiMH-Batterie gilt als zuverlässig und leistungsfähig, weshalb sie sich auch in den vergangenen Jahren im Fahrzeugbereich etabliert hat. Heutige Verbesserungen beziehen sich meist auf Kosten, Packaging bzw. Batteriemanagement. Die Vorteile gegenüber anderer Systeme sind eine hohe passive Sicherheit, eine hohe Lebensdauer und eine Robustheit gegen kurzzeitige Über- oder Tiefentladung. Im Gegenzug dazu hat sie ein relativ hohes

Systemgewicht und die maximale Energieeffizienz ist auf 92 % beschränkt. [10]

Natrium-Nickelchlorid-Hochtemperatur-Batterie (ZEBRA) Sie zählt zu den Hochtemperatur-Batterien mit einem Arbeitsbereich von 250-350 °C. Als Reaktionspartner werden Natriumchlorid und Nickel eingesetzt, als Elektrolyt kommt eine Keramik zum Einsatz, die Natriumionen durchlässig ist. Sie besitzt im Vergleich zu den anderen Batterien eine hohe Energiedichte und einen hohen Wirkungsgrad (siehe *Tabelle 2.3*) und zeichnet sich durch eine hohe Robustheit, eine hohe Lebensdauer und niedrige Kosten aus. Nachteile sind die hohe Betriebstemperatur und die Selbstentladung. Aufgrund der angeführten Eigenschaften findet sie nur im Elektroauto Einsatz. [10]

Lithium-Ionen Batterie Sie unterscheidet sich in ihrer Arbeitsweise von den anderen Batterietypen. In den Elektroden werden die Lithium-Atome in einem Wirtsgitter gespeichert. Die Gitter können aus verschiedenen Materialien bestehen, wobei sich die Eigenschaften und Wirkungsgrade ändern. Die einzige Anforderung ist, dass sie Lithium aufnehmen können muss. Daraus ergeben sich aber unterschiedliche Eigenschaften, in Abhängigkeit vom eingesetzten Material. Als negative Elektrode wird ein Metall benutzt, das ein Potenzial nahe dem von Lithium hat. Als Kathode wird häufig Graphit und als Anode Lithium-Cobaltdioxid ($LiCoO_2$) eingesetzt. [36]

Wasserstofftank

Neben der Brennstoffzelle ist das Wasserstoffspeichersystem die zweite entscheidende Komponente in einem Brennstoffzellen-Fahrzeug. Die geringe Dichte von Wasserstoff (H_2) stellt für die Speicherung und den Transport große Herausforderungen dar. Derzeit werden die folgenden Verfahren für die Speicherung angewendet, wobei dem Druckgasspeicher die größten Potenziale zugeschrieben werden.

Druckgasspeicher Die Speicherung von verdichtetem, gasförmigen Wasserstoff wird in als Druckgasspeicherung bezeichnet. Er wird als CGH_2 (compressed gaseous hydrogen) bei Drücken von 200-900 bar in einem Druckbehälter gespeichert. Die Befüllung der Tanks erfolgt in kurzer Zeit, weshalb ein entsprechendes Druckgefälle notwendig ist. Bei Drucktanks von 700 bar ist erforderlich, dass im Hochdruck-Zwischenspeicher ein Druck von etwa 900 bar vorherrscht. Aufgrund der hohen Drücke werden hohe Ansprüche an Material, Konstruktion

und Sicherheit gestellt. Das Gewicht der Tanksysteme ist sehr hoch. Im Moment liegt das Systemgewicht des Speichers bei rund 20-40 kg pro gespeichertem Kilogramm Wasserstoff. Wegen der günstigen Spannungsverteilung werden zumeist Zylindertanks benutzt.

Es gibt verschiedene Typen von Druckgasspeichersystemen. Die Typen 1-3 weisen einen dichten Innenbehälter (Liner) aus Metall (Stahl oder Aluminium) auf und werden entweder teilweise oder vollständig von einem Mantel aus Kohlenstoff-Faser umgeben. Beim Typ 4 ist auch der Liner aus Kunststoff. Dieses hat den Vorteil, dass sie leichter, jedoch auch teurer als Stahlflaschen sind. Bei der Druckspeicherung kann eine im Wesentlichen stabile und verlustfreie Speicherung gewährleistet werden. Typ 3 und 4 können Nominaldrücke von 700 bar, so wie es aktuell in der Automobilbranche üblich ist, ermöglichen. [31]

Metallhydridspeicher Der Metallhydridspeicher lagert Wasserstoff in chemischen oder physikalischen Verbindungen ein. Es wird genutzt, dass bestimmte Metalle die Eigenschaft zeigen, Wasserstoffatome auf Zwischengitterplätze einzulagern und bei Bedarf wieder abgeben. Durch Zufuhr von Wärme oder durch Absenken des Druckes wird der Wasserstoff wieder abgegeben.

Grundsätzlich hat dieses Verfahren den Nachteil, dass nur ein geringer Anteil der Gesamtspeichermasse auf den Wasserstoff fällt. Ein weiteres Problem sind die Temperaturen (bis zu 400°C), die erforderlich sind, um den Wasserstoff wieder freizusetzen. [11]

Kryogen Speicher Die dritte Art ist die Speicherung von Wasserstoff in verflüssigter Form. Um dies realisieren zu können, muss er zunächst verflüssigt werden und kann anschließend tiefkalt als LH_2 (liquid hydrogen) gespeichert werden. Die flüssige Speicherung erhöht die Energiedichte, jedoch beginnt eine Kondensation erst bei -252,85 °C und dies erfordert einen sehr hohen Energieaufwand. Übliche Kryogen-Speicher für die automotive Anwendung erreichen volumetrische Energiedichten von 2 kWh/kg bzw. 1,2 kWh/dm³. [31]

Tabelle 2.3: Gegenüberstellung der technischen Parameter verschiedener Batterietypen [10]

| | Pb-Gel | NiCd | NiMH | ZEBRA | Li-Ion |
|----------------------|----------------|-------------|-------------|--------------|---------------|
| Theor. Energiedichte | [Wh/kg] 170 | 210 | 220-380 | 790 | 500 |
| Prakt. Energiedichte | [Wh/kg] 20-50 | 40-55 | 40-80 | 100-120 | 110 |
| Leistungsdichte | [Wh/kg] 80-100 | <200 | <200-1.300 | 110-150 | 500 |
| Selbstentladung | | | | | |
| elektrisch | 0,1-0,4 | 0,6-1 | 15-20 | - | 0,15 |
| thermisch | - | - | - | 15-17 | - |
| Ladeaufnahme | | | | | |
| [%] | 50 in 2 h | 97 in 0,5 h | 97 in 0,5 h | 90 in 3,5 h | 95 in 1 h |
| [%] | 100 in 5 h | 100 in 1 h | 100 in 1 h | 100 in 5 h | 100 in 4 h |
| Wartungsfreiheit | ja | ja/nein | ja | ja | ja |
| Recyclingfähigkeit | 98 | 100 | - | - | - |
| Lebensdauer | | | | | |
| kalendарisch | [Jahre] 3-5 | >4 | - | 5 | - |
| Zyklen | [-] 700-800 | 2.000 | 2.000 | >600 | 2.000 |

Kapitel 3

Rohstoffe – Identifizierung der betrachteten Rohstoffe

Grundsätzlich werden sehr viele Elemente des Periodensystems in einem Fahrzeug eingesetzt. Aufgrund der Aufgabenstellung werden in dieser Arbeit jedoch nur anorganische Rohstoffe berücksichtigt.

Nachfolgend wird daher zunächst geklärt, welche Rohstoffe allgemein bereits als kritisch eingestuft werden und im weiteren behandelt werden. Im nächsten Abschnitt wird untersucht, welche der kritischen Rohstoffe in den neuen Antriebskonzepten benötigt werden und in welcher Menge. Anschließend werden dann die selektierten Rohstoffe analysiert, wobei es auch zu beantworten gilt, hinsichtlich welcher Gesichtspunkte die Analyse durchgeführt werden muss.

3.1 Identifizierung kritischer Rohstoffe

Als Grundlage dient die Studie CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU [3], in der eine Liste an Rohstoffen erstellt wurde, die die Wirtschaft der Europäischen Union in Zukunft beeinträchtigen können. Als kritischer Rohstoff werden in der Studie all jene bezeichnet, bei der die beiden Indikatoren „Versorgungsrisiko“ und „Folgen einer mangelnden Versorgung“ als hoch – hohe Kritikalität – eingeschätzt werden. Dazu wurden einerseits die geopolitischen und ökonomischen Rahmenbedingungen berücksichtigt, welche direkt oder indirekt Auswirkungen auf Angebot und Nachfrage haben, andererseits wurden die Auswirkungen bei Veränderungen auf die europäische Wirtschaft untersucht.

Beim Versorgungsrisiko wird zwischen drei Risiken

- geologische,
- technische und
- geopolitisch-wirtschaftliche Verfügbarkeit

unterschieden. Daraus wird zur Einschätzung des Versorgungsrisikos ein Index aus einer Kombination von vier Elementen gebildet: Konzentration der Förderung auf Länderebene, Stabilität und Staatsführung der Förderländer, Anteil des Recyclings zur Deckung des heutigen Bedarfs und die Möglichkeit der Substitution (siehe *Formel 3.1*).

$$Versorgungsrisiko = (1 - \rho_i) \left\{ \sum_{i=1}^s A_{is} \sigma_{is} \right\} \left\{ \sum_{i=1}^c (S_{ic})^2 WGI_c \right\} \quad (3.1)$$

mit

| | | |
|---------------|------|---|
| ρ_i | .... | Anteil am heutigen Bedarf, der aus Sekundärmaterial gedeckt wird - Werte von 0 (keine Deckung durch Sekundärmaterial) bis 1 (Deckung ausschließlich durch Sekundärmaterial) |
| A_{is} | .... | Anteiliger Bedarf von Rohstoffen i in Wirtschaftssektor s - Werte von 0 (geringer Anteil) bis 1 (hoher Anteil) |
| σ_{is} | .... | Geschätzte Substituierbarkeit von Rohstoff i in Wirtschaftssektor s - Werte von 0 (leichte und vollständige Substituierbarkeit) bis 1 (keine Substituierbarkeit) |
| S_{ic} | .... | Anteilige Produktion von Rohstoff i in Land c - Werte von 0 (geringer Anteil) bis 100 (ausschließliche Produktion) |
| WGI_{ic} | .... | World Governance Index für Land c - Werte von 0 (kein Risiko) bis 10 (hohes Risiko) |

Um die Folgen einer mangelnden Versorgung von Rohstoffen angemessen vergleichen zu können, gibt es zwei wesentliche Überlegungen: Zum einen ist die ökonomische Bedeutung der Sektoren zu beachten, die die Rohstoffe unmittelbar in ihrem Produktionsprozess einsetzen. Zum anderen ist bei Sektoren, die essenzielle Vorleistungen für andere Sektoren erbringen und ihnen bei Ressourcenausfall auch schaden, die Vernetzung innerhalb der Volkswirtschaft von Bedeutung. Dadurch sind Rohstoffe, die in volkswirtschaftlich bedeutenderen Sektoren verbraucht werden, tendenziell von größerer wirtschaftlicher Bedeutung als jene, die in wirtschaftlich unbedeutenderen Sektoren benötigt werden.

Der Umwelt-Länder-Index, welcher die Umweltrisiken in den Förderländern angibt, berechnet sich ähnlich dem Versorgungsrisiko. Dabei werden die Konzentration

der Rohstoffvorkommen nach Ländern, die Substituierbarkeit und die Recyclingrate miteinbezogen.

Durch die Berechnungen der beiden Indikatoren – Versorgungsrisiko und Folgen einer mangelnden Versorgung – wurden 12 Rohstoffe bzw. Rohstoffgruppen als kritisch identifiziert, da sie sowohl ein hohes Versorgungsrisiko, als auch eine hohe wirtschaftliche Bedeutung aufweisen. Der Grund für das hohe Versorgungsrisiko ist meist eine Produktionskonzentration in China, Russland, der Demokratischen Republik Kongo oder Brasilien, die oft mit geringer Substituierbarkeit und niedriger Recyclingrate einhergeht.

Die dabei identifizierten Rohstoffe sind jene, die im Periodensystem, siehe *Abbildung 3.1*, dunkelblau hinterlegt sind. Die Studie fasst die Platingruppenmetalle¹ und die Seltenen Erden² zusammen. Sowohl Lithium (Li), als auch Kupfer (Cu) – in der Abbildung hellblau hinterlegt – werden in der angesprochenen Studie nicht als kritisch identifiziert. Aufgrund der hohen medialen Präsenz, stark steigender Rohstoffpreise, der wachsenden Nachfrage an diesen Elementen und des verstärkten Einsatzes in den zukünftigen Antriebskonzepten, werden sie dennoch in die Betrachtungen dieser Arbeit mit aufgenommen. Diese Vorselektion ist notwendig, da die Rohstoffindustrie nicht in einem isolierten Wirtschaftsraum agiert, sondern stark durch die Entwicklung anderer Wirtschaftszweige (wie zum Beispiel der Elektronikindustrie, der Bauindustrie und der Fahrzeugindustrie) beeinflusst wird und diese außerhalb des Betrachtungsumfanges liegen.

Die identifizierten Rohstoffe werden im nächsten Schritt analysiert. Berücksichtigt wird, dass auf der einen Seite die Rohstoffindustrie nicht isoliert von anderen Industriezweigen agiert und andererseits beeinflussen sich einzelnen Stoffe, hinsichtlich ihrer Charakteristik bzw. Preis, auch untereinander. So kann zum Beispiel der Preis eines Co-Produktes³ (siehe *Abbildung 3.2*) vom Preis des Primärmetalls beeinflusst werden. Eine weitere Möglichkeit wäre, wenn zwei Rohstoffe in der selben geographischen Region abgebaut werden bzw. den selben Umwelteinflüssen, Gesetzen oder Steuern unterliegen.

Grundsätzlich werden die Rohstoffe als Erze abgebaut, konzentriert und in einem

¹Platingruppenmetalle (PGM) sind eine Zusammenfassung der Rohstoffe: Ruthenium (Ru), Rhodium (Rh), Palladium (Pd), Osmium (Os), Iridium (Ir) und Platin (Pt).

²Seltene Erden werden die beiden Rohstoffe Scandium (Sc), Yttrium (Y) der dritten Gruppe und die Lanthanoide: Lanthan (La), Cer (Ce), Praesodym (Pr), Neodym (Nd), Promethium (Pm), Samarium (Sm), Europium (Eu), Gadolinium (Gd), Terbium (Tb), Dysproium (Dy), Holmium (Ho), Erbium (Er), Thulium (Tm), Yttererbium (Yb) und Lutetium (Lu) genannt.

³Co-Produkte sind jene Rohstoffe, die mit anderen Rohstoffen – dem Primärmetall – abgebaut werden.

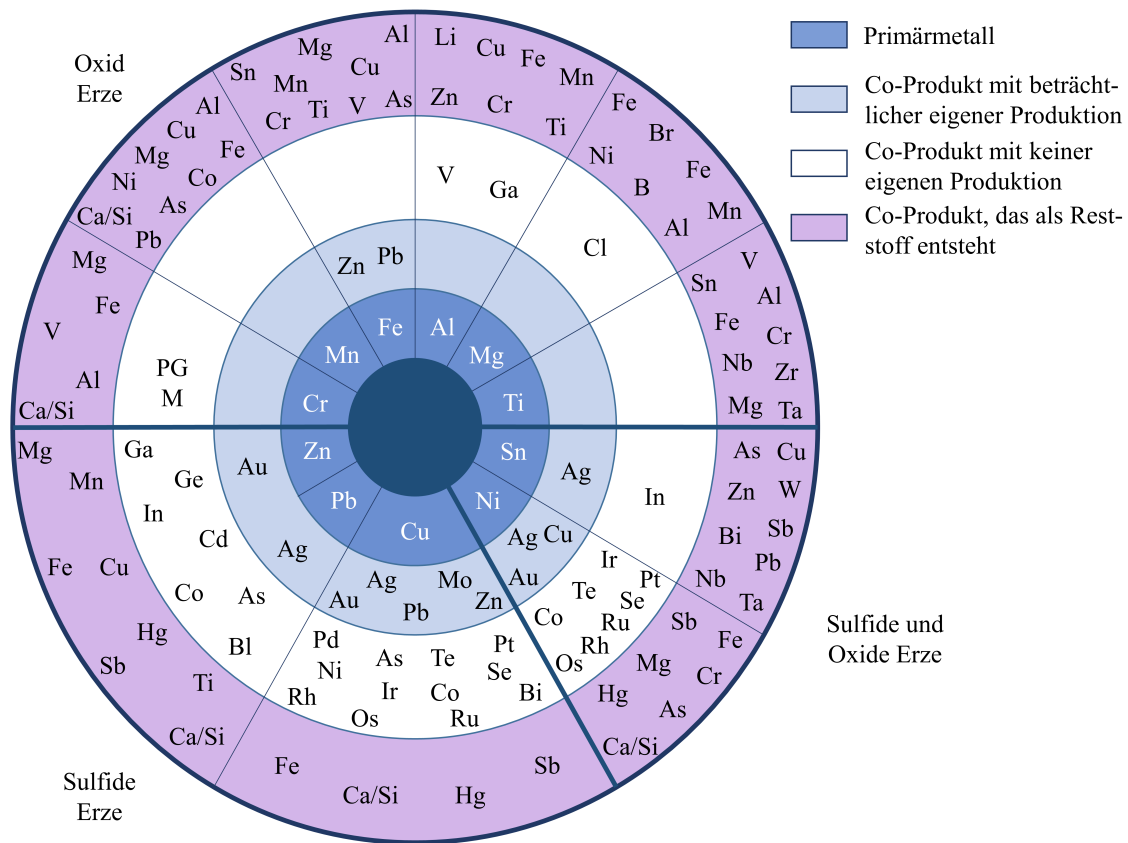


Abbildung 3.2: Rohstoffkreis [3], [Eigene Darstellung]

land existiert ein Potenzial von 850.000 t Kupferschrott und 500.000 t Aluminiumschrott in Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen inkl. Klärschlamm. Auf diese Art könnten theoretisch 142 % des jährlichen Gesamtbedarfs an Kupfer in Deutschland gedeckt werden. Recycling ist daher, aus Sicht der stofflichen Nutzung, besonders wichtig und wesentlich bei einer ganzheitlichen Betrachtung von Rohstoffmärkten.

Die Analyse der Rohstoffe und deren Märkte unterteilen sich in eine Betrachtung der Vergangenheit und daraus schließend, kann eine Abschätzung von möglichen Entwicklungen in der Zukunft gemacht werden. Die Bewertung der Rohstoffe wird unter Zuhilfenahme folgender Literaturquellen durchgeführt:

- den jährlichen Veröffentlichungen, als auch den Berichten der U.S. GEOLOGICAL SURVEY,
- den jährlichen Daten der *World-Mining-Data* des österreichischen BUNDESMINISTERIUMS FÜR WIRTSCHAFT, FAMILIE UND JUGEND,
- und diversen Berichten und Fachbüchern.

Betrachtet man die Entwicklungen auf dem Rohstoffmarkt von 1900-2006, dann zeichnen sich nach [37] vier Trends ab, die sich grundsätzlich alle Metalle teilen:

1. Die Preise (nominal) der Metalle sind zu Beginn des 20. Jahrhunderts gering gestartet und enden in der Periode hoch. Betrachtet man die Rohstoffpreisentwicklung inflationsbereinigt⁴, so sind sie nur geringfügig höher und teilweise sogar geringer als zu Beginn.
2. Die Preisfluktuationen sind am Anfang und am Ende des Betrachtungszeitraumes am höchsten.
3. Im Jahr 2006 werden bei den meisten Metallen historische Höchststände notiert. Des Weiteren gibt es Preisspitzen vor dem Ersten Weltkrieg, kaum preisliche Veränderungen während des Zweiten Weltkrieges – begründet durch starke Preisregulierungen – und anschließend noch einen Anstieg in der Post-Vietnam-Ära (1980).
4. Angebot und Nachfrage entscheiden nicht ausschließlich über den Preis.

An den letzten Punkt anschließend, drängt sich nun die Frage auf, welche Faktoren auf die einzelnen Märkte einwirken.

3.2 Einsatz von Rohstoffen bei alternativen PKW-Antriebskonzepten

Für die Berechnungen des Einflusses der Rohstoffe bzw. zur Ermittlung des gesamten Bedarfs muss er je Konzept ermittelt werden. Dazu werden die Daten aus der Datenbank [39] herangezogen⁵. Dort werden die Rohstoffmengen auf das Fahrzeuggewicht bezogen. Nachdem sich die untersuchten Antriebskonzepte in dieser Arbeit alle auf die selbe Fahrzeugklasse beziehen (siehe *Abschnitt 2.2*), jedoch die eingesetzten Leistungen variiert werden, soll ein Bezug dazu aufgebaut werden. Dazu werden die Daten auf die, in der Datenbank angegebene, Fahrzeugmasse und Leistungen

⁴Unter Inflationsbereinigt versteht man, wenn ein Preis unter Abzug der Inflationsrate dargestellt wird.

⁵In Datenbank [39] sind auch Angaben zu weiteren notwendigen Materialien und Rohstoffen zur Herstellung von Fahrzeugen zu finden. Für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit werden jedoch nur jene Rohstoffe betrachtet die innerhalb des gewählten Betrachtungsumfanges (siehe *Kapitel 1*) liegen. Es ist aber anzunehmen, dass der auch nicht kritische Rohstoffe die Herstellkosten wesentlich beeinflussen.

skaliert. Dies führt zu den Rohstoffmengen je Komponente, wie sie in *Tabelle 3.1* angegeben sind.

Abhängig von der Komponente beziehen sich die Gewichtsangaben auf die jeweiligen Leistungen, wie sie *Abbildung 2.10* zu entnehmen sind. Durch Verknüpfung der Rohstoffmenge je Leistung mit der Leistung je Komponente kann die Menge je Komponente ermittelt werden. Zum Beispiel die Verbrennungskraftmaschine, die im CV mit 90 kW gewählt worden ist, benötigt 12,4 kg Kupfer, wobei hier notwendige Anbauteile wie Lichtmaschine, Leitungen etc. ebenfalls berücksichtigt werden. Insgesamt benötigt das CV für den Antrieb – Verbrennungskraftmaschine und Antriebsstrang – Kupfer von 14,5 kg. Nicht berücksichtigt werden jene Teile, die unabhängig vom Antrieb bei allen Konzepten gleichermaßen benötigt werden, wie zum Beispiel Karosserie oder Sitze.

Sowohl der Rohstofftyp, als auch die Rohstoffmenge pro Leistung variieren je nach eingesetztem Fahrzeug und Hersteller. So kommen z. B. in unterschiedlichen Batterietypen verschiedene Rohstoffe zum Einsatz, aber auch der selbe Typ kann unterschiedliche Mengen eines Rohstoffes benötigen. Deswegen werden in dieser Arbeit Durchschnittswerte von heute üblichen Technologien aus der Literatur benutzt. Mögliche Alternativen und Optimierungspotenziale werden im vorhergehenden Kapitel besprochen.

Tabelle 3.1: Rohstoffeinsatz pro Komponente [39], [40], [Eigene Berechnungen]

| | Kupfer | Lithium | Graphit | Indium | Gallium |
|---------------------------------|------------------|----------------|----------------|---------------|--------------------------|
| Verbrennungskraftmaschine | 0,138 | - | - | - | - |
| Elektromotor | 0,198 | - | - | - | - |
| Brennstoffzellen-Stack | - | - | - | - | - |
| Energiespeicher | - | - | 0,0003 | - | - |
| Traktionsbatterie | 0,826 | 0,126 | 1,421 | - | - |
| Wasserstofftank | - | - | 0,200 | - | - |
| Antriebsstrang | 0,023 | - | - | - | - |
| Steuer- und Leistungselektronik | 0,477 | - | - | 0,00018 | 0,000018 |
| Thermo-Management | 2,45 | - | - | - | - |
| Abgasnachbehandlung | - | - | - | - | - |
| | | | | | |
| | Germanium | Kobalt | SEE | PGM | |
| Verbrennungskraftmaschine | - | - | - | - | kg/kW _{VKM} |
| Elektromotor | - | 0,013 | 0,031 | - | kg/kW _{EM} |
| Brennstoffzellen-Stack | - | - | - | 0,0007 | kg/kW _{BZ} |
| Energiespeicher | - | - | - | - | kg/kWh _{ES} |
| Traktionsbatterie | - | - | - | - | kg/kWh _{TB} |
| Wasserstofftank | - | - | - | - | kg/kg _H |
| Antriebsstrang | - | - | - | - | kg |
| Steuer- und Leistungselektronik | 0,000025 | - | - | - | kg/kW _{Elektro} |
| Thermo-Management | - | - | - | - | kg |
| Abgasnachbehandlung | - | - | - | 0,000027 | kg/kW _{VKM} |

3.3 Analyse von Rohstoffen

In einem funktionierenden Markt ist der Preis jener, indem sich das Angebot und die Nachfrage im Gleichgewicht befinden. Das bedeutet, dass der Preis jener ist, bei der die Angebots- gleich der Nachfragemenge ist. Die Analyse wird daher in eine Untersuchung der Angebots- und der Nachfragesituation unterteilt.

Mittels empirischer Fakten und statistisch-deskriptiver Analysen⁶ werden die Entwicklungen der Vergangenheit analysiert. Aufgrund der Übersichtlichkeit sind die detaillierten Daten in Tabellenform im Anhang (siehe *Kapitel 10*) ausgewiesen.

3.3.1 Analyse der Angebotssituation

Eine Reduzierung der Preisbestimmung auf Angebot und Nachfrage ist nicht ausreichend, jedoch können sie als Überbegriffe für Faktoren, die entweder Angebot- oder Nachfrageseite beeinflussen, herangezogen werden. Die Angebotsseite zeigt die Verfügbarkeit eines Rohstoffes am Markt auf. Sie erstreckt sich vom Vorkommen des Erzes, über den Abbau bis zum Handel.

Produktion und Vorkommen Sie stellen die weltweit abgebauten und aufbereiteten Mengen eines Rohstoffes dar. Die Daten werden aus den jährlichen Veröffentlichungen des U.S. GEOLOGICAL SURVEY bzw. des BUNDESMINISTERIUMS FÜR WIRTSCHAFT, FAMILIE UND JUGEND übernommen. Aufgrund der Erfassungsmodalität – Fragebögen an die jeweiligen Nationalkomitees, Aussendungen von Botschaften und Außenhandelsstellen, Bergbaustatistiken – kann es dazu kommen, dass die Daten und Angaben in den einzelnen Veröffentlichungen und Jahren variieren. Für die Betrachtungen werden die aktuellsten verfügbaren Daten herangezogen.

Marktkonzentration der Produktionsländer Wie schon erwähnt, ist für einen ganzheitlichen Ansatz bei der Analyse nicht nur die absolute Menge der Produktion der einzelnen Rohstoffe wesentlich, sondern auch in welchen Mengen und in welchen geographischen Gebieten, üblicherweise auf einzelne Länder reduziert, der Rohstoff abgebaut wird. Um nun die Konzentration der einzelnen Abbauländer feststellen zu können, wird der Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI) berechnet.

Wie bereits in *Abschnitt 1.2* beschrieben, wird nach [6] der HHI als ein Maß zur Bewertung der Konzentration der Marktteilnehmer am Markt herangezogen.

⁶Statistisch-deskriptive Analysen haben zum Ziel Kennzahlen, Tabellen und Grafiken zu charakterisieren und zu beschreiben.

Berechnet wird er, durch Bildung der Summe der quadrierten Marktanteile a_i (in Prozent) der einzelnen Länder. Die Marktanteile sind der Anteil der abgebauten Menge pro Land, in Abhängigkeit von der Gesamtabbaumenge.

$$HHI = \sum_{i=1}^n a_i^2 \quad (3.2)$$

$$a_i = \frac{p_i}{\sum_{r=1}^n p_r} \quad (3.3)$$

mit

a_i Marktanteile [%]
 p_i Produzierte Menge [kg]

Reserven und Ressourcen Um Abschätzungen und eine Aussage über die langfristige Verfügbarkeit von Rohstoffen machen zu können, unterscheidet man hinsichtlich zweier Dimensionen. Die erste ist das Wissen über die Verfügbarkeit des Rohstoffes und die zweite Dimension ist die Wirtschaftlichkeit des Abbaus bzw. der Gewinnung (siehe *Abbildung 1.2*).

Konzentration der Reserven Analog zur Marktkonzentration kann mittels HHI (siehe *Formel 3.2*) auch die Konzentration der Reserven bestimmt werden. Es können so mögliche zukünftige Veränderungen beurteilt werden. Aufgrund der angesprochenen Volatilität hinsichtlich der Veränderung der Grenzen ist Vorsicht geboten. Dennoch kann er zeigen, wie sich die Reserven in Abhängigkeit vom Preis ändern. Dies kann zum Beispiel durch erhöhte Explorationstätigkeiten bei steigenden Preisen bedingt sein.

Statische Reichweite (in Jahren) Die statische Reichweite stellt den Quotienten aus Reserven und der jährlichen Produktions- bzw. Fördermenge dar.

$$\text{Statische Reichweite} = \frac{\text{Reserven}}{\text{Produktion}} \quad (3.4)$$

In der Literatur wird die statische Reichweite meist sehr kontroversiell diskutiert. Im berühmten Bericht des Club of Rome aus dem Jahr 1972 zur Lage der Menschheit

[41] wird die Situation der Rohstoffe diskutiert. Sie beziffern die Statische Reichweite von Aluminium (100 Jahren), Gold (11 Jahre) und Zinn (17 Jahren), jedoch ist bis jetzt noch kein einziger dieser angeführten Rohstoffe zu Ende gegangen. Die Reichweite ist eine Momentaufnahme und zeigt daher eine Verknappung an, die meist nur unter bestimmten Rahmenbedingungen gegeben ist. Grund dafür ist die Abgrenzung zwischen Reserven und Ressourcen, wie schon zuvor angesprochen. Eine zur Neige gehende Statische Reichweite ist meist ein Indikator, die Explorationstätigkeiten zu steigern. [42]

Ressourcenreichweite (in Jahren) Eine Alternative zur Statischen Reichweite stellt die Ressourcenreichweite dar. Man berechnet hier die Reichweite als Quotient von Ressourcen und Produktion.

$$\text{Ressourcenreichweite} = \frac{\text{Ressourcen}}{\text{Produktion}} \quad (3.5)$$

3.3.2 Analyse der Nachfragesituation

Auf der Nachfrageseite stehen Marktteilnehmer, die für die Produktion eines Produktes einen bestimmten Rohstoff benötigen. Sie sind dazu auch bereit, eine gewisse Summe zu zahlen, jedoch gibt es einen Grenzwert, bei dem der Nachfrager entweder über alternative Rohstoffe, alternative Produktionsprozesse oder sogar über den Austausch einer Technologie nachdenkt. Aufgrund der ungenauen Datenlage in der Literatur kann nur eine oberflächliche Analyse der Nachfragesituation durchgeführt werden.

Etwa 8 % des weltweit eingesetzten Kupfers gingen bislang in den gesamten Verkehrssektor. Viel größere Anteile sind bislang durch das Bauwesen (39 %) und die Elektroindustrie (37 %) benötigt worden. [43] Auch wenn in [22] davon ausgegangen wird, dass eine Verschiebung innerhalb der Wertschöpfungsklassen stattfinden wird, ist damit zu rechnen, dass die bisher klassischen Anwendungsgebiete nicht wegfallen und daher ein wesentlicher Einflussfaktor auf den Bedarf darstellen werden.

3.4 Anwendung der Analyse auf die eingesetzten Rohstoffe

Im nachstehenden Abschnitt werden jene Rohstoffe analysiert, die in *Abschnitt 3.1* als kritisch identifiziert worden sind und in den Fahrzeugen benötigt werden (siehe *Abschnitt 3.2*). Die Analysen werden, wie in *Abschnitt 3.3* beschrieben, durchgeführt für den Zeitraum von 2000-2010. Zum Ende dieser Periode hat die Weltwirtschaftskrise begonnen, weshalb in diesem Kapitel die Rohstoffe beschrieben werden. Daraus resultierende Fehler können nicht abgeschätzt werden, weshalb für die weiteren Berechnungen die jeweiligen Daten aus dem Jahr 2010 herangezogen werden.

3.4.1 Kobalt

Kobalt ist ein Metall, das in vielen verschiedenen Wirtschaftssektoren seine Anwendung findet. Zumeist wird es in Verbindung mit Nickel (siehe *Tabelle 3.2*) gefunden und hat einen leicht blauen Schimmer, den man schon in der Antike zum Färben von Gläsern nutzte. Das Einsatzgebiet von Kobalt ist sehr breit, so wird es zum Beispiel als Legierungsmetall in der Stahlherstellung für Hart- und Schneidemetalle benutzt. Des Weiteren findet es Anwendung für wärmebeständige Magnete, Katalysatoren und in der chemischen Industrie. Kobalt wird zumeist in Verbindung mit Nickel (siehe *Tabelle 3.2*) gefunden, was deren ähnliches chemisches Verhalten erklärt. [44]

Tabelle 3.2: Kobalt-Mineralerale [44], [Eigene Darstellung]

| Kobalt Minerale | | Kobaltgehalt [%] |
|----------------------------|---|------------------|
| Kobaltglanz (Cobaltit) | CoAsS | 35 |
| Speiskobalt (Skutterudit) | CoAs ₃ | 28 |
| Kobaltnickelkies (Linneit) | (Co,Ni) ₃ S ₄ | bis 53 |
| Kobaltblüte (Erythrin) | Co ₃ (AsO ₄) ₂ x8H ₂ O | |

Produktion und Vorkommen Kobalt findet man als Spurenelement in vielen Böden und Erzen und nimmt in der weltweiten Verbreitung Platz 32 ein [44]. Seit dem Jahr 2003 steigen die Produktionsmengen, hauptsächlich durch die Erschließung neuer Produktionsstätten, aber auch durch Steigerungen der Produktionsmengen von etablierten Herstellern [45]. Der Kongo konnte so die gestiegene Nachfrage der, hauptsächlich in China sitzenden, Raffinerien ausgleichen. Zukünftig soll dieses aber

erschwert werden, da auf der einen Seite die Regierung des Kongos bestimmt hat, dass nur mehr bereits raffiniertes Kobalt exportiert werden darf und auf der anderen Seite die Kosten für den Transport steigen. [46]

Aufgrund des anhaltend hohen Preises wurden einige Projekte zur Erschließung neuer Minen und Raffinerien in Australien, der Demokratischen Republik Kongo, Finnland und Sambia geplant [47]. Im Jahr 2008 ist daher auch um rund 5 % mehr raffiniertes Kobalt am Markt, jedoch kommt es im darauffolgenden Jahr, durch Streiks von Arbeitern in Kanada und Schließung von Minen in Sambia zu geringeren Produktionsmengen. Der Markt beginnt sich wieder von der angespannten Weltwirtschaftslage im Jahr 2010 zu erholen und das Angebot von Kobalt wird wieder erhöht. [48]

Das größte Abbau Land im Jahr 2010 (siehe *Tabelle 10.3*) ist die Demokratische Republik Kongo in Zentralafrika, wo mit 47.400 metr.t rund 53 % des weltweit gesamten Kobalterzes abgebaut worden sind. Danach folgen die weiteren Abbaugelände in China mit 6.500 metr.t, Russland mit 6.200 metr.t, der Republik Sambia mit 5.700 metr.t, Kanada mit 4.600 metr.t und Australien mit 3.850 metr.t. Insgesamt wurden so im Jahr 2010 89.450 metr.t produziert, das ist eine Steigerung von knapp 24 % zum Vorjahr.

Die Produktion (siehe *Tabelle 10.3*) ist in den letzten Jahren, mit Ausnahme der Jahre 2007 und 2009 gestiegen. Die weltweite Produktion stieg jährlich um etwa 9 %, was dazu führte, dass sich die Produktion im Vergleich des Jahres 2000 mit dem Jahr 2010 fast verdreifacht hat. Insbesondere China hat diese Entwicklungen vorangetrieben, das Kobalterz in großen Mengen in der Demokratischen Republik Kongo kaufte, um es in den eigenen Raffinerien weiter zu verarbeiten [48].

Marktkonzentration der Produktionsländer Im zeitlichen Verlauf ist die Konzentration bei den Produktionsländern stark gestiegen. So hat sich der Markt von einem mäßig konzentrierten (HHI im Jahr 2000: 1.472) zu einem kritisch konzentrierten Markt entwickelt (HHI im Jahr 2010: 3.021). Lediglich im Jahr 2007 konnte eine kurzfristige Entspannung des Marktes festgestellt werden, was auf eine reduzierte Produktion des Hauptproduzenten zurückzuführen ist .

Reserven, Ressourcen und Konzentration der Reserven Weltweit haben sich die Reserven positiv entwickelt. Die größten Reserven werden auch vom größten Produzenten der vergangenen Jahre mit knapp 3,5 Millionen metr.t gemeldet. Die zweitgrößten Reserven liegen in Australien (1,4 Millionen metr.t), danach sind die

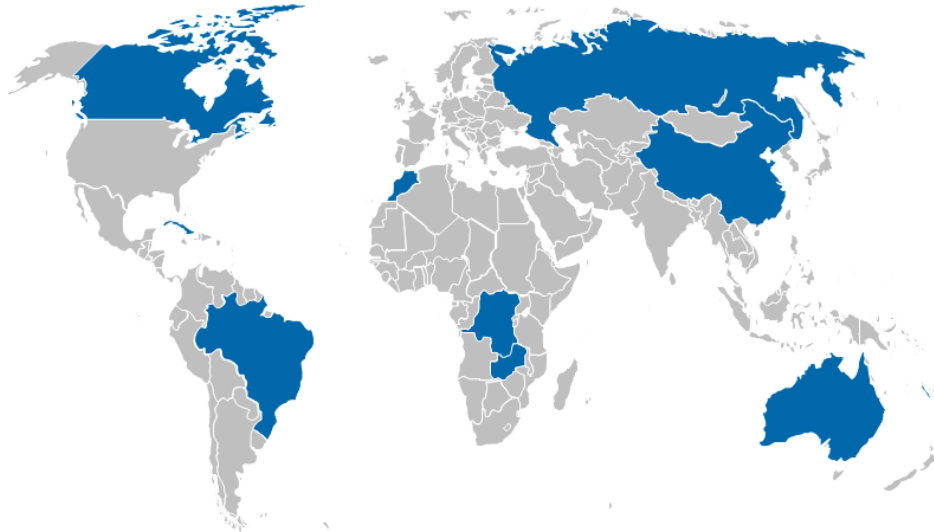


Abbildung 3.3: Größte Abbauländer von Kobalt im Jahr 2010 [48], [Eigene Darstellung]

Reserven gleichmäßiger und in kleineren Mengen verteilt. Die sinkende Konzentration der vergangenen beiden Jahre lässt zwar drauf schließen, dass die Macht eines Landes geringer wird, jedoch ist bei einem HHI von 2.667 im Jahr 2010 (der maximale HHI in der Betrachtungsperiode war im Jahr 2004 bei 3.193) noch immer von einer kritischen Konzentration zu sprechen.

Die weltweiten Kobaltressourcen werden auf etwa 15 Millionen metr.t geschätzt, wobei davon etwa eine Million metr.t in den Vereinigten Staaten sein dürften. Sie dürften hauptsächlich in Nickel-Kupfer-Sulfiten in Australien, Kanada und Russland liegen und in den Kupfersedimenten des Kongos und Sambia. Etwa 1 Milliarde metr.t werden am Meeresboden vermutet, jedoch sind das bis jetzt lediglich theoretische Vermutungen. [48]

Statische Reichweite und Ressourcenreichweite Trotz steigender Reserven hat sich die statische Reichweite in vergangener Zeit von etwa 180 Jahren im Jahr 2001 auf rund 84 Jahre im Jahr 2010 reduziert. Der Verlauf der Ressourcenreichweite

zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die statische Reichweite auf. Im Jahr 2001 gab es bei beiden Verläufen einen Knick und seitdem zeichnet sich ein Abwärtstrend ab. Die Ressourcenreichweite lag im Jahr 2010 noch bei 168 Jahren.

Nachfrage und Preis Im Jahr 2001 lagen die Hauptanwendungsgebiete für Kobalt in Supralegerungen und in wiederaufladbaren Batterien. 2002 haben mehrere Faktoren, aber hauptsächlich durch eine schwache Wirtschaft in den Vereinigten Staaten und Japan dazu geführt, dass die Gesamtnachfrage zurückgegangen ist. [49] Die Nachfrage konnte sich aber nur kurzfristig erholen, da 2005 der hohe Preis diese wieder gedrückt hat. Ab dann konnte die Nachfrage Jahr für Jahr gesteigert werden bis 2008. Seit dem Wechsel zum Jahr 2009 hat die globale Wirtschaftskrise auch die Nachfrage von Kobalt stark beeinflusst, was negative Auswirkungen auf den Preis zeigte. [48]

3.4.2 Kupfer

Der Bronzezeit geht, sowohl kulturell aber auch geschichtlich, die Kupferzeit voraus. Was Kupfer für damalige Zeiten so besonders machte, ist, dass es auch in natürlicher Form als Blech vorkommt. Als Metall stellt es daher, neben Gold, Silber und Quecksilber, eine Ausnahmen dar, da es auch in Reinform in der Natur vorhanden ist und nicht, wie andere Metalle, in hüttentechnischen Prozessen gewonnen werden muss.

Kupfer wird in unterschiedlichen Gesteinen gefunden. In der Erdkruste wird ein durchschnittlicher Kupfergehalt von 55 ppm berechnet und im Meerwasser ein Gehalt von 0,002 ppm. Jedoch unterscheidet sich der Kupfergehalt in den verschiedenen Mineralien (siehe *Tabelle 3.3*). Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Spurenkonzentration steigt, je dunkler ein Mineral ist. Was damit begründet ist, dass Kupfer eine sehr hohe Affinität zu Schwefel hat. [44]

Tabelle 3.3: Kupfer-Mineralerale [44], [Eigene Darstellung]

| Kupfer-Mineralerale | | Kupfergehalt [%] |
|----------------------------|--|-------------------------|
| Reines Kupfer | | 100 |
| Kupferkies (Chalcopyrit) | CuFeS_2 | 35 |
| Kupferglanz (Chalcosin) | Cu_2S | 80 |
| Kupferglanz (Digenit) | Cu_9S_5 | 78 |
| Buntkupfererz (Bornit) | Cu_5FeS_4 | 63 |
| Kupferindig (Covellin) | CuS | 66 |
| Rotkupfererz (Cuprit) | Cu_2O | 89 |
| Malachit | $\text{Cu}_2([\text{OH}_2]/\text{CO}_3)\text{O}$ | 57 |
| Kupferlasur | $\text{Cu}(\text{OH}/\text{CO}_3)$ | 55 |
| Fahlerz(e), Cu mit As, Sb | | |
| Enargit | Cu_3AsS_4 | 48 |

Großen Einfluss auf die verschiedenen Angebots- und Nachfragefaktoren haben die Recycling- und Substitutionsrate. Die Recyclingrate von Kupfer ist im Vergleich zu den anderen Rohstoffen sehr hoch und liegt konstant bei über 30 %. Seit dem Jahr 2004 kann sogar ein Anstieg verzeichnet werden, was zu einer Rate von 35 % im Jahr 2010 führte. Aufgrund seiner hohen Elektrizitäts- und Wärmeleitfähigkeit bietet sich für Kupfer ein großes Anwendungsgebiet bei Stromleitungen, Radiatoren, Datenleitungen und Rohrleitungen an. Die Substitution von Kupfer steigt durch alternative Rohstoffe – nicht nur aufgrund des gestiegenen Preises, sondern auch durch die Nachfrage von neuen Technologien – konstant, daher werden Datenleitungen aus Glasfaserkabel, Titan und Eisen bei Wärmetauscher und Aluminium bei Stromleitungen eingesetzt. [50]

Produktion und Vorkommen Nach einer Periode, in der die Produktionsmengen annähernd konstant waren, stieg die Produktion 2004 um etwa 900.000 metr.t im Vergleich zum Vorjahr, getrieben durch einen verstärkten Abbau in Chile und Peru. Dieses kann nur eingeschränkt die seit einigen Jahren vorherrschenden Unterschiede zwischen Angebot und Nachfrage ausgleichen, welche sich im Jahr 2003 auf 375.000 t und 700.000 t 2004 beliefen. [50] In den beiden darauffolgenden Jahren stieg die weltweite Gesamtproduktion um 2,75 % (2005) und 0,83 % (2006) an, wobei China seine Produktion um 21,8 % und 17,9 % steigerte. Ab 2006 ist es gelungen, wieder eine ausgeglichene Bilanz zwischen Angebot und Nachfrage herstellen

zu können. [51] Anhaltende Streiks in Chile und Indonesien lassen die Produktion nicht so schnell wie erhofft wachsen und die Nachfrage ist höher als das Angebot. [48]

Marktkonzentration der Produktionsländer In der gesamten Betrachtungsperiode gehört Chile in allen Bereichen zum weltweit größten Produzenten und dominiert mit etwa einem Drittel der gesamten Minenproduktion den Markt. Gefolgt wird es von Peru, China und USA, wobei die größten Abbauländer im Jahr 2010 in *Abbildung 3.4* eingezeichnet sind.

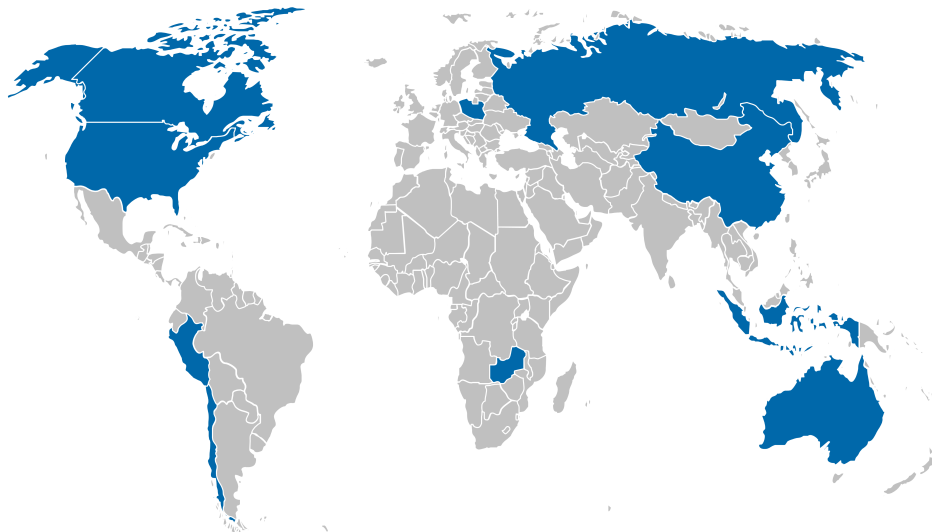


Abbildung 3.4: Größte Abbauländer von Kupfer im Jahr 2010 [48], [Eigene Darstellung]

Die Konzentration ist dennoch in den vergangenen Jahren zurückgegangen. Dafür gibt es mehrere Gründe: Auf der einen Seite hat China seine Abbaukapazitäten gesteigert, aber auch andere „kleinere Abbauländer“ wie Australien, Peru, Russland, etc. wollten von den gestiegenen Preisen profitieren und erhöhten ihre Kapazitäten. Auf der anderen Seite haben sich die Kapazitäten der einzelnen Länder angeglichen, was dazu führte, dass es weniger große Marktteilnehmer gibt. Der Markt ist zwar im

Jahr 2010 konzentriert, jedoch hat sich die Lage über die letzten Jahre entspannt. [48]

Reserven, Ressourcen und Konzentration der Reserven Die Reserven haben sich zwischen 2000 und 2010 mit 687 Millionen Tonnen fast verdoppelt. Ähnlich der Produktion ist auch die Verteilung der Reservenlagerstätten. Die beiden größten Produzenten (Chile und Peru) verfügen über rund 44 % der weltweiten Reserven, was auch die hohe Konzentration erklärt. Die Ressourcen sind über die vergangenen zehn Jahre gestiegen und haben in 2010 drei Milliarden Tonnen betragen. 2003 wurden dazu noch Tiefseereserven von etwa 700 Millionen Tonnen angegeben. [50]

Statische Reichweite und Ressourcenreichweite Die Reserven sind in den letzten Jahren schneller gestiegen als die Produktion, was dazu führte, dass sich die statische Reichweite auf über 40 Jahre 2010 entwickelte. Die Ressourcenreichweite liegt jedoch, unter Berücksichtigung der aktuellen Produktionszahlen, bei mehr als 150 Jahren.

Nachfrage und Preis Die Preise für Kupfer sind seit 2000 um ein Vielfaches gestiegen (siehe *Tabelle 10.4*). Im Jahr 2006 stieg der Preis kurzzeitig auf über 400 Cent/lb an, was dem doppelten Maximum aus 2005 entspricht. Der hohe Preis führte aber auch dazu, dass die Spekulationen stark angestiegen sind [47]. Ab dem Jahr 2008 zeigen sich die Auswirkungen der Weltwirtschaftskrise im Kupferpreis, dessen Höhepunkt im Jahr 2009 erreicht wurde. Die Nachfrage ist im Jahr 2010 geringer, durch die sinkende Nachfrage in der EU, Japan und USA, jedoch hat China sehr viel davon ausgeglichen [52].

3.4.3 Lithium

Die Einsatzgebiete von Lithium sind breit, z. B. in der Kerntechnik – zum Beispiel als Kühlmittel von Reaktoren, als Neutronenabsorber zur Abschirmung –, in der Medizin gegen manisch-depressive Zustände und schlussendlich auch in Energiespeichern. Es ist das leichteste aller Metalle aus dem Periodensystem und hat die Ordnungszahl 3. In *Tabelle 3.4* sind die Lithiumführenden Minerale verzeichnet. In der Erdkruste kommt Lithium mit etwa 20 ppm vor. Die wichtigsten Lagerstätten sind wahrscheinlich Salzlauge, aus denen das Metall günstiger gewonnen werden kann als aus Gestein. [44]

Tabelle 3.4: Lithiumführende Minerale [44], [Eigene Darstellung]

| Lithiumführende Minerale | | LiO₂-Gehalt [%] |
|---------------------------------|--|-----------------------------------|
| Amblygonit | (Li, Na)Al([F, OH]/PO ₄) | 10 |
| Spodumen | LiAl(Si ₂ O ₆) | 8 |
| Lepidolith | K ₂ Li ₄ Al ₂ ([F, OH] ₂ /Si ₄ O ₁₀) ₂ | 5 |
| Zinnwaldit | K(Li, Fe, Al) ₃ (F, OH) ₂ (AlSi ₃ O ₁₀) | 5 |
| Petalit | LiAlSi ₄ O ₁₀ | 5 |

Die Substitution ist mit hohen Kosten verbunden. [53] Hinsichtlich des Recyclings werden zwar technische Möglichkeiten aufgezeigt, jedoch gehen sie mit sehr hohen Kosten und schlechten Wirkungsgraden einher, was dazu führt, dass in den Tabellen des U.S. GEOLOGICAL SURVEY keine Recyclingraten angeführt sind.

Produktion und Vorkommen Die größten Produzenten von Lithium im Jahr 2010 sind in *Abbildung 3.5* zu finden. Hinsichtlich der weltweiten Produktionskapazitäten ist eine Steigerung zu bemerken, wobei die größte Steigerung vom Jahr 2003 auf 2004 verzeichnet wurde. Dies liegt an den gestiegenen Produktionskapazitäten Argentiniens. Im Jahr der Krise 2009 wurde ein Minus von 26,2 % im Vergleich zum Vorjahr verzeichnet, wobei auch schon 2008 ein geringeres Minus von 1,5 % angeschrieben wurde. Dies wurde jedoch mit einem Plus von 49,9 % im Jahr 2010 ausgeglichen. Im Vergleich zum Jahr 2000 wurde 2010 um 101,9 % mehr Lithium produziert. Zu erkennen ist, dass die Produktionsmengen dem weltweiten Bruttoinlandsprodukt hinsichtlich des Wachstums sehr ähnlich sind [54].

Marktkonzentration der Produktionsländer Wie in *Tabelle 10.5* zu sehen ist, lag die Gesamtabbaumenge von Lithium im Jahr 2010 bei 28.100 metr.t, wobei auf Chile 10.510 metr.t und auf Australien 9.260 metr.t entfallen sind. Sie sind die beiden größten Abbauländer mit 70,4 %. Es ergibt sich folglich 2010 ein HHI von 2.804 – ein konzentrierter Markt, der aufgrund der vergrößerten Produktionsmenge von Chile um 87 %, was wiederum einen Anstieg um 9,1 % gegenüber dem Vorjahr entspricht, gestiegen ist. Über den Betrachtungszeitraum der Analyse gesehen ist der HHI jedoch lediglich um etwa 2 % gestiegen.

Reserven, Ressourcen und Konzentration der Reserven Chile ist nicht nur größtes Abbauland, sondern hält auch die größten Reserven, gefolgt von China,

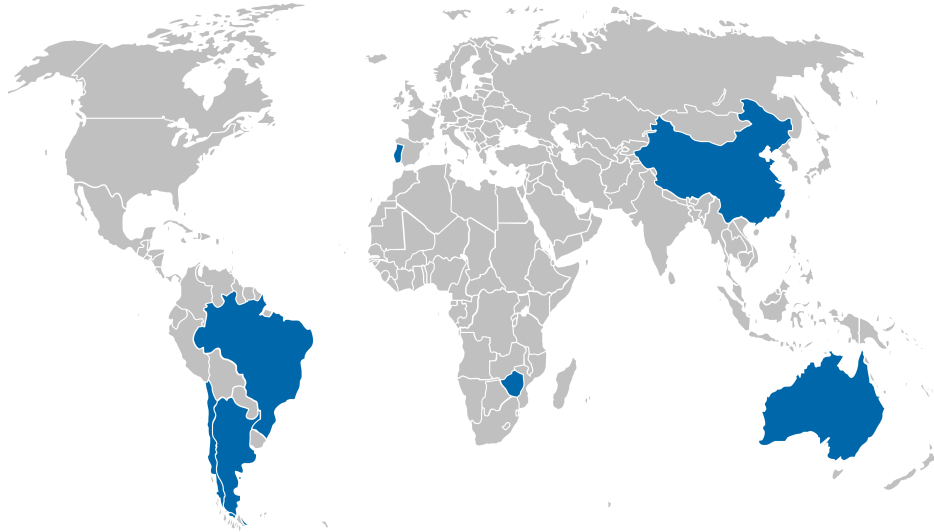


Abbildung 3.5: Größte Abbauländer von Lithium im Jahr 2010 [48], [Eigene Darstellung]

dem drittgrößten Produktionsland und Australien. Die drei Länder halten gemeinsam 92,7 % der weltweiten Reserven. Dies führt zu einer hohen Konzentration der Reserven mit einem HHI von 4.205. Im Vergleich zum Jahr 2000, mit einem HHI von 7.884, wird hier aber ein Rückgang verzeichnet. Es ist zwar ungeklärt, ob dies auf einer schlechten Datenqualität basiert, es kann aber als Tatsache angesehen werden, dass die Reserven von Lithium äußerst konzentriert sind.

Nach [48] ist weltweit mit Ressourcen von 34.000 Millionen metr.t zu rechnen. Im zeitlichen Verlauf werden ebenfalls steigende Mengen eingetragen.

Statische Reichweite und Ressourcenreichweite Steigende Ressourcen und Reserven führen zu höheren Reichweiten. Im Jahr 2010 ist mit einer statischen Reichweite von 460 Jahren zu rechnen, im Vergleich zu 243,7 Jahren im Jahr 2000. Ähnlich dazu verhält sich die Ressourcenreichweite von 1.210 Jahren in 2010, im Vergleich zu 917 Jahren in 2000.

Nachfrage und Preis Durch die steigende Nachfrage Chinas planen die größten australischen Minenbetreiber ihre Kapazitäten zu verdoppeln. Speziell durch den Bedarf an wiederaufladbaren Batterien ist in den vergangenen Jahren die Nachfrage nach Lithium gestiegen, wobei es auch für andere Technologien wie Computer, Kameras, Uhren, etc. benötigt wird. [48] Dies führt dazu, dass der Preis beinahe stetig gestiegen ist. Wie aber auch schon die Produktion und die Nachfrage, weist der Preis eine hohe Korrelation zur weltweiten Wirtschaftslage auf.

3.4.4 Graphit

Graphit ist eine natürliche Erscheinung von Kohlenstoff und ein sehr häufiges Mineral in der Erdoberfläche. Kohlenstoff steht im Periodensystem an der ersten Stelle der vierten Hauptgruppe. Es besitzt eine hohe elektrische und Wärme- Leitfähigkeit. [55] Neben seinem Einsatz in Bleistiftminen findet es unter anderem in Kohlebürsten elektrischer Maschinen, Elektroden und als Legierungselement Anwendung.

Zwar werden in den Daten des U.S. GEOLOGICAL SURVEY keine konkreten Angaben zum Recycling gemacht, jedoch wird in [48], [52], [56] die technische Möglichkeit beschrieben. Mit geringen Kosten ist die Substitution von Graphit z. B. durch Molybdän möglich. [57]

Produktion und Vorkommen In *Abbildung 3.6* sind die zehn größten Abbau- länder von Graphit im Jahr 2010 auf einer Weltkarte eingezeichnet. In *Tabelle 10.6* sind die einzelnen Daten zusammengefasst. 2010 war China mit 600.000 metr.t der größte Produzent, gefolgt von Indien mit 140.000 metr.t und Brasilien mit 76.000 metr.t. Insgesamt wurden 925.000 metr.t abgebaut, was einem Rückgang von 15,4 %, im Vergleich zum Vorjahr entspricht. Von 2004 bis 2008 konnte eine stetig steigende weltweite Produktion verzeichnet werden. Durch die Erholung der weltweiten Wirtschaft ist auch der Bedarf an Graphit wieder gestiegen und blieb 2010 und 2011 stabil. [48]

Marktkonzentration der Produktionsländer Wie schon im vorhergehenden Punkt angesprochen, ist China der mit Abstand größte Produzent von Graphit. Im Jahr 2010 bedient das Land 64,9 % des Weltmarktes, obwohl es die Produktion reduziert hat. Dennoch konnte China diese Position im zeitlichen Verlauf kontinuierlich ausbauen. Im Jahr 2010 lag der HHI bei 4.524, im Vergleich dazu lag er in den Jahren zuvor bei 5.562 (2009) und 5.449 (2008). Zusammengefasst wird aber

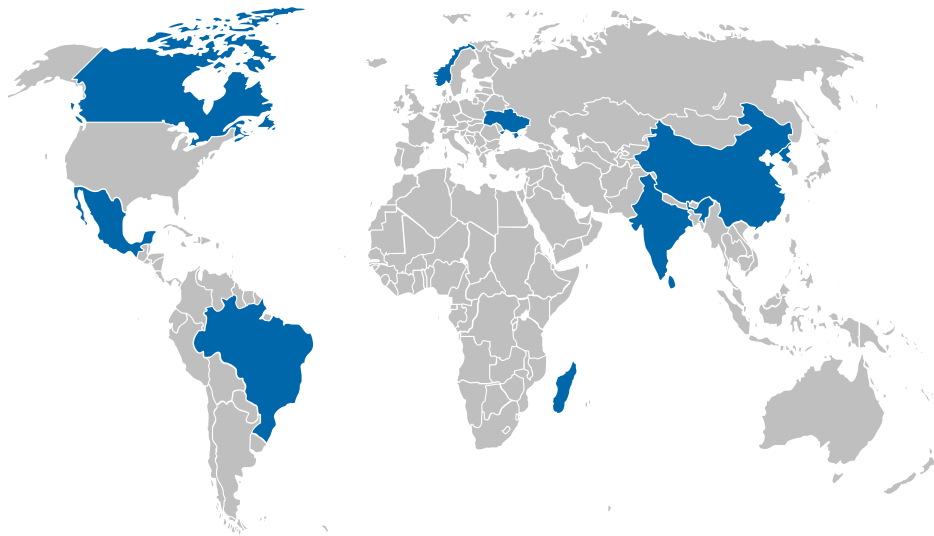


Abbildung 3.6: Größte Abbauländer von Graphit im Jahr 2010 [48], [Eigene Darstellung]

von einer konzentrierten Marktsituation gesprochen.

Reserven, Ressourcen und Konzentration der Reserven Insgesamt werden im Jahr 2010 Reserven von 76.8 Millionen metr.t gemeldet, wobei dies einem Zuwachs von 8,2 % zum Vorjahr entspricht. Dieser wird von Indien angegeben, dem Land mit den zweitgrößten Reserven. Die größten Reserven liegen in China, welches 71,6 % der gesamten Reserven besitzt. Durch die größeren Reserven von Indien, hat sich die Konzentration nur unwesentlich entspannt mit einem HHI von 5.421 im Jahr 2010 zu 6.157 im Jahr 2009. Auch hier muss daher, wie bei der Produktion, von einem höchst konzentrierten Markt gesprochen werden.

Statische Reichweite und Ressourcenreichweite Die statische Reichweite wird für das Jahr 2010 mit 83 Jahren berechnet. Diese ist höher als die Jahre zuvor, was an den gesteigerten Produktionstätigkeiten liegt. Es kann daher aufgrund der sich erholenden Weltwirtschaft davon ausgegangen werden, dass die Reichwei-

te in Zukunft wieder sinken wird. Eine mögliche Entwicklung daraus wäre daher, dass die Preise ansteigen werden. Aufgrund der umfangreichen Ressourcen im Vergleich zu der Produktion, wird eine Ressourcenreichweite von vielen tausend Jahren berechnet.

Nachfrage und Preis Die Nachfrage ist in den vergangenen Jahren angestiegen. Der Preis war 2010 mit 720 \$/t um 17,1 % höher als im Jahr 2000. Im Jahr mit der höchsten Produktion 2008 wurde ein Preis von 753 \$/t erzielt. Eine Korrelation zwischen Preis und Produktion kann aber nicht festgestellt werden, da der geringste Preis 2004 erzielt worden ist (siehe *Tabelle 10.6*).

3.4.5 Indium

Indium ist ein Metall der dritten Hauptgruppe. Die Abbauggebiete sind sehr klein und über die Welt verteilt, was ein durchschnittliches Vorkommen von 0,1 ppm in der Erdkruste erklärt. Die größten Vorkommen liegen in Kombination mit Blei, Zink, Cadmium oder Gallium vor. Die Eigenschaften sind denen von Blei sehr ähnlich. Man kann damit auf Papier schreiben. Es ist so weich, dass es sich mit der Hand formen und sich sehr leicht zu Folien walzen lässt. Eingesetzt wird Indium einerseits als Beschichtung gegen Korrosion oder, aufgrund des hohen Reflexionsgrades, in Spiegeln und andererseits wird es in der Halbleitertechnik, sowie für Dioden eingesetzt. [44]

Produktion und Vorkommen Im Vergleich zu 2000 hat sich die gesamte Produktion im Jahr 2010 annähernd auf 609 metr.t verdoppelt. Bis auf wenige Jahre (2002, 2007, 2009) konnte eine jährliche Steigerung der Produktion registriert werden. Seit 2005 ist China für mehr als 50 % der gesamten Produktion verantwortlich und ist somit der größte Produzent. Danach folgen Japan und Südkorea mit jeweils 11,5 %, Kanada mit 11 %, Belgien mit 4,9 % und Brasilien mit 0,8 %. Davor haben auch Russland, Peru, Frankreich und Deutschland Abbaumengen gemeldet.

Marktkonzentration der Produktionsländer Der HHI von Indium lag im Jahr 2010 bei 3.527, was dafür spricht, dass der Markt konzentriert ist. Von 2003 zum Jahr 2004 ist die Konzentration um 71,7 % auf 2.986 gestiegen, nachdem Frankreich und Deutschland die Produktion reduziert hatten und China seinen ausgebaut hat. Seitdem gilt der Indium-Markt als sehr konzentriert.

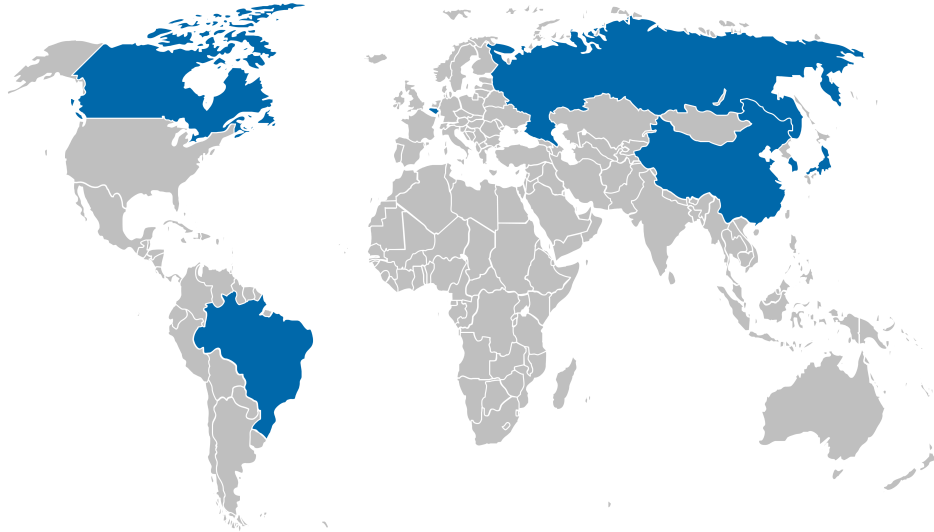


Abbildung 3.7: Größte Abbauländer von Indium im Jahr 2010 [48], [Eigene Darstellung]

Reserven, Ressourcen und Konzentration der Reserven Angaben zu Reserven sind nicht verfügbar, folglich auch nicht zur Konzentration. Das Vorkommen von Indium in der Erdkruste wird mit 0,1 ppm geschätzt [44]. In [52] werden die Ressourcen mit 150.000 metr.t abgeschätzt.

Statische Reichweite und Ressourcenreichweite Aufgrund der fehlenden Angaben zu den Reserven kann keine statische Reichweite berechnet werden. Ebenso verhält es sich mit der Ressourcenreichweite im Jahr 2010. Würde man die Daten von 2009 heranziehen, würde sich eine Ressourcenreichweite von etwa 275 Jahren ergeben.

Nachfrage und Preis Bis zum Jahr 2006 stieg der Preis für Indium, danach hat sich der Preis negativ entwickelt, wobei im Jahr 2009 der Tiefpunkt mit 500 \$/kg erreicht wurde. Japan ist weltweit der größte Abnehmer von Indium, dessen Nachfrage im Jahr 2010 um 20 % im Vergleich zum Vorjahr, angestiegen ist. Dies

führte dazu, dass sich der Preis nach 2009 wieder leicht erholte und im Jahr 2010 wieder bei 609 \$/kg notierte.

3.4.6 Gallium

Gallium steht in der vierten Periode des Periodensystems und ist ein selten vorkommendes Metall. Wie in *Abbildung 3.2* dargestellt, gibt es keine Primärproduktion. Häufig wird es in Kombination mit Aluminium gefunden, was auch die Ähnlichkeit hinsichtlich der chemischen Eigenschaften erklärt. Gallium findet seinen Einsatz in der Halbleitertechnik, insbesondere für Leuchtdioden und in der Leistungselektronik. [58]

Die Versuche, den Rohstoff zu recyceln sind in den vergangenen Jahren angestiegen. Dies ist sowohl auf die schlechte Ausbeute bei der Produktion, als auch auf die gestiegene Nachfrage zurückzuführen. Aufgrund der dissipativen Struktur ist der Einsatz von recyceltem Material nur schwierig möglich. Im Moment geht man davon aus, dass das Recycling nahezu unmöglich ist. [59]

Produktion und Vorkommen Nach [60] wurde im Jahr 2010 Gallium, mit einer Gesamtproduktion von 70 metr.t lediglich von fünf Ländern produziert: China, Ukraine, Kasachstan, Japan und Ungarn. In [48] wird die Produktion auf etwa 182 metr.t geschätzt. Seit 2000 kann festgestellt werden, dass die Produktion um ein Vielfaches angewachsen ist.

Marktkonzentration der Produktionsländer Die steigenden Nachfragen führten dazu, dass der Markt seit 2006, bis dorthin von zwei Ländern (China und Japan) dominiert, von mehreren Ländern bedient wird. Das wiederum lässt darauf schließen, dass die Konzentration im zeitlichen Verlauf zurückgegangen ist. Dennoch bedient China weiterhin mehr als 50 % des gesamten Marktes, was darauf schließen lässt, dass der Markt konzentriert ist.

Reserven, Ressourcen und Konzentration der Reserven Angaben zu Reserven sind nicht verfügbar, folglich auch nicht zur Konzentration. In den Angaben des U.S. Geological Survey werden die weltweiten Ressourcen mit 1.000.000 metr.t angegeben.



Abbildung 3.8: Größte Abbauländer von Gallium im Jahr 2010 [48], [Eigene Darstellung]

Statische Reichweite und Ressourcenreichweite Aufgrund der fehlenden Angaben zu den Reserven kann keine statische Reichweite berechnet werden. Die schlechte Datenqualität bei der Produktion führt dazu, dass die Ressourcenreichweite nur unter Vorbehalt berechnet werden kann. Nachdem die Produktion im Vergleich zu den Reserven sehr gering ist, kann davon ausgegangen werden, dass von der Reichweite keine Gefahr ausgeht.

Nachfrage und Preis Die Nachfrage ist durch den Einsatz in den Leuchtmitteln von Bildschirmen für Handys und Computern in den vergangenen Jahren stark angestiegen. was auch dazu geführt hat, dass der Preis auf 600 \$/kg 2010 im Vergleich zu 443 \$/kg in 2006 gestiegen ist. Aufgrund der Weltwirtschaftskrise ist der Preis 2009 kurzfristig eingebrochen ist. Im Vergleich zum Jahr 2000 ging der Preis sogar um 6,3 % zurück.

3.4.7 Germanium

Germanium steht, wie Gallium, in der vierten Periode des Periodensystems, jedoch in der vierten Hauptgruppe, der Kohlenstoffgruppe. Es wird daher zu den Halbmetallen gezählt. Haupteinsatzgebiete sind die Halbleitertechnik in der Elektronik, die Hochfrequenztechnik, als Zusatzstoff zur Erhöhung des Brechungsindex von Glasfasern, in der Nuklearmedizin, als Arzneimittel, und viele mehr.[61]

Produktion und Vorkommen Nach den Aufzeichnungen der WORLD MINING DATA [60] wurden 2010 59 metr.t produziert, was einem Rückgang von 11,9 % zum Vorjahr entspricht. Im zeitlichen Verlauf wurde jedoch im Jahr 2009 am meisten produziert. Betrachtet man die Produktionsmengen von 2000 bis 2010, so wurde gegen Ende um 43,9 % mehr produziert. In *Abbildung 3.9* sind die vier Produktionsländer China, Ukraine, Vereinigte Staaten und Russland von Germanium aus dem Jahr 2010 auf der Weltkarte eingezeichnet.

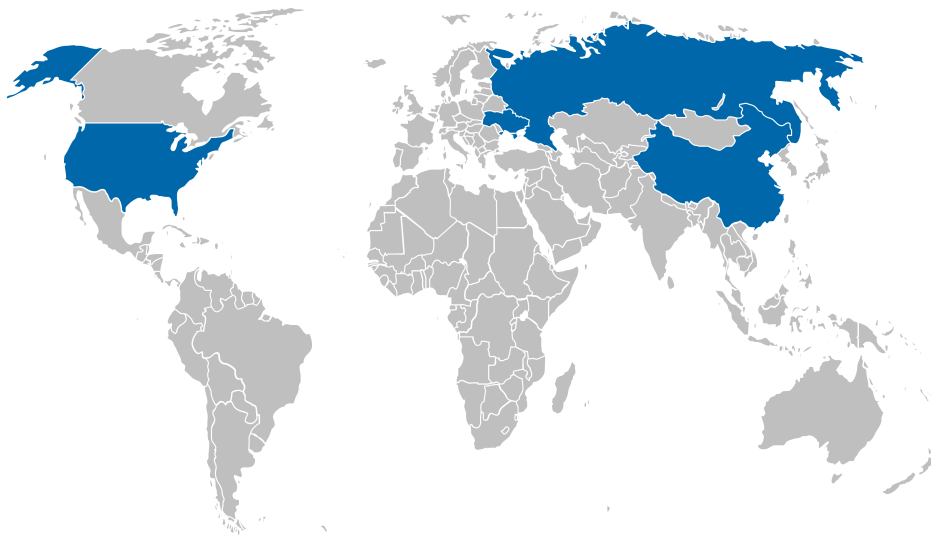


Abbildung 3.9: Größte Abbauländer von Germanium im Jahr 2010 [48], [Eigene Darstellung]

Marktkonzentration der Produktionsländer Wie zuvor angesprochen, wird der Markt in Zukunft auf vier Produzenten aufgeteilt. Bis zum Jahr 2008 war die Ukraine noch kein Produzent, was dazu führte, dass die Marktkonzentration nachgelassen hat, wobei zuvor China die Abbaumengen gesteigert hat und die Vereinigten Staaten die Produktion gedrosselt haben. Die Marktkonzentration hat sich mit einem HHI von 6.786 - China hat 81,1 % des gesamten Germaniums produziert - bis 2008 zugespitzt und lässt seither eine leichte Entspannung (HHI 2010: 4.174) erkennen. Dennoch kann von einem konzentrierten Markt gesprochen werden.

Reserven, Ressourcen und Konzentration der Reserven Der Literatur sind keine Zahlen für Reserven und Ressourcen zu entnehmen.

Statische Reichweite und Ressourcenreichweite Aufgrund der fehlenden Angaben zu den Reserven und Ressourcen können keine Reichweiten berechnet werden.

Nachfrage und Preis Durch den Einsatz in Glasfaserkabeln ist die Nachfrage nach Germanium bis 2009, insbesondere in den Vereinigten Staaten und Japan, stark gestiegen. Der Einsatz in Solarzellen usw. hat die Nachfrage in den vergangenen Jahren in die Höhe getrieben, was dazu führte, dass der Preis bis 2008 auf 1.490 \$/kg gestiegen ist. [5] Durch die globale Weltwirtschaftskrise ist zunächst die Nachfrage zurückgegangen, parallel zum Ausbau der Produktion, was zu einem Rückgang des Preises von 36,9 % auf 940 \$/kg resultierte. Die Nachfrage hat sich anschließend in den ersten Monaten des Jahres 2010 nur leicht erholen können, was dazu geführt hat, dass der Durchschnittspreis im Jahr 2010 bei 1.200 \$/kg lag [48].

3.4.8 Seltene Erden

Unter den Seltenen Erden (SEE) werden alle Metalle der dritten Nebengruppe verstanden. Es ist daher ein Sammelbegriff für die Erdelemente Scandium, Yttrium und die Lanthanoide (Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium und Lutetium). Das Einsatzgebiet der Metalle ist sehr vielfältig und reicht von der Legierung für die Herstellung von Metallen, als Dauermagnet, in Leuchtmitteln, in Bildschirmen, bis hin zum Kontrastmittel in der Radiologie. [62]

Der Begriff Seltene Erde ist irreführend, kommen die meisten Elemente doch häufiger vor als zum Beispiel Blei, Gold oder Platin. Ihr Durchschnittsgehalt in der

Erdkruste liegt bei mehr als 180 ppm. [44]

Produktion und Vorkommen Einzelne Elemente der Seltenen Erden werden weltweit abgebaut. 2010 wurde China als größter Produzent (97,5 % vom Gesamtmarkt) registriert, der auch die größten Vorkommen besitzt. Gefolgt wird China in der Produktion von Indien und Brasilien, wobei die beiden gemeinsam etwa 2,5 % des gesamten Marktes bedienen. [48] Die weiteren Abbauländer des Jahres 2010 werden in *Abbildung 3.10* angeführt. Im Vergleich zum Jahr 2000 ist im Jahr 2010 um etwa 60 % mehr abgebaut worden.

Der Anstieg der Produktion von 2009 auf 2010 liegt bei 0,6 %, wobei sie 2010 mit 133.380 metr.t am höchsten lag. Im Jahr 2009 ist allerdings kein Rückgang verzeichnet worden. Weltweit werden aufgrund der steigenden Preise bereits stillgelegte Minen wieder aktiviert, was einen Anstieg der Produktionsmenge erwarten lässt [48]. Auch in Österreich werden mögliche Explorationstätigkeiten geprüft [63].

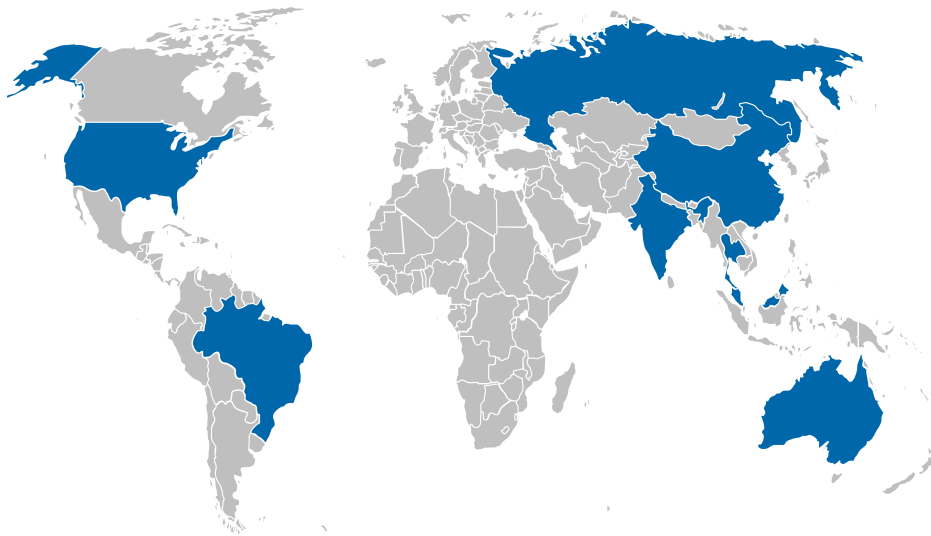


Abbildung 3.10: Größte Abbauländer von Seltenen Erden im Jahr 2010 [48], [Eigene Darstellung]

Marktkonzentration der Produktionsländer Wie schon zuvor erwähnt, war China im Jahr 2010 der weltweit größte Produzent von Seltenen Erden. Dies gilt für die gesamte Betrachtungsperiode. China wies nie einen Marktanteil unter 73 % auf. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass der Markt in höchstem Maße (HHI: 9.504) konzentriert ist.

Reserven, Ressourcen und Konzentration der Reserven Im Unterschied zur Dominanz von China in der Produktion sind die Vorkommen weltweit verteilt. Die Verteilung der Reserven gilt mit einem HHI von 3.129 zwar auch als konzentriert, jedoch sieht die Konzentration hier nicht so dramatisch aus wie bei der Produktion. Insgesamt werden Reserven von 113.778.000 metr.t gemeldet, wobei ein Anstieg über die Jahre verzeichnet wird. Angaben zu den Ressourcen sind der Literatur nicht zu entnehmen.

Statische Reichweite und Ressourcenreichweite Die statische Reichweite lag bei 853 Jahren im Jahr 2010 und bei 847 Jahren in 2009. Aufgrund der fehlenden Angaben zu den Ressourcen kann keine Ressourcenreichweite berechnet werden.

Nachfrage und Preis Aufgrund des nur langsam steigenden Angebots, allerdings schnell steigenden Nachfrage ist der Preis von SEE zunächst auf 9.421,97 \$/kg angestiegen [47]. Seither entwickeln sich die Nachfrage und Angebot annähernd konstant, was dazu führt, dass die Preise seitdem nur gering (+0,9 %) gestiegen sind auf 9504,18 \$/kg. Jedoch zeigt sich nun wieder, dass die Nachfrage schneller steigt als das Angebot, was steigende Preise erwarten lässt [48].

3.4.9 Platingruppenmetalle

Die Platingruppenmetalle (PGM) fassen die Metalle Ruthenium, Rhodium, Palladium, Osmium, Iridium, sowie Platin zusammen. Man findet sie fast immer gemeinsam, wobei sich, je nach geologischer Gegebenheit, die Zusammensetzung verändert. Man schätzt, dass der durchschnittliche Gehalt in der Erdkruste bei etwa 0,05 mg/t liegt. Das Einsatzgebiet der Platinmetalle ist aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften vielschichtig. So wird es als Beschichtungen in Katalysatoren, in der Elektronikindustrie, als Heizleiter und als Thermolemente, sowie in der Schmuckindustrie eingesetzt. [64]

Meist kann man PGM durch andere Metalle der Gruppe substituieren. Auch ein

Ersetzen durch andere Metalle ist möglich, was aber meist mit einem Effizienzverlust verbunden ist. Zurzeit liegt die Recyclingrate bei etwa 7 %, jedoch ist mit noch großen Entwicklungspotenzialen zu rechnen. [48]

Produktion und Vorkommen Im Jahr 2010 lag die Produktion von PGM bei 192.548 kg, wobei sie im Jahr 2006 bereits bei 220.680 kg lag. Aufgrund der schwächelnden Weltwirtschaft ist danach die Produktion zurückgegangen, wobei im Jahr 2009 mit 181.580 kg ein Wendepunkt erreicht worden ist und wieder ein Anstieg gemeldet wurde. Die Hersteller sind in *Abbildung 3.11* auf der Weltkarte eingezeichnet. Die beiden größten Produzenten sind Südafrika mit 148.000 kg und Russland mit 25.100 kg. Sie bedienen gemeinsam 89,9 % des gesamten Marktes. Weitere Produzenten mit geringen Produktionskapazitäten sind Simbabwe (4,6 %), Kanada (2,0 %), die Vereinigten Staaten (1,8 %) und Kolumbien (0,5 %).

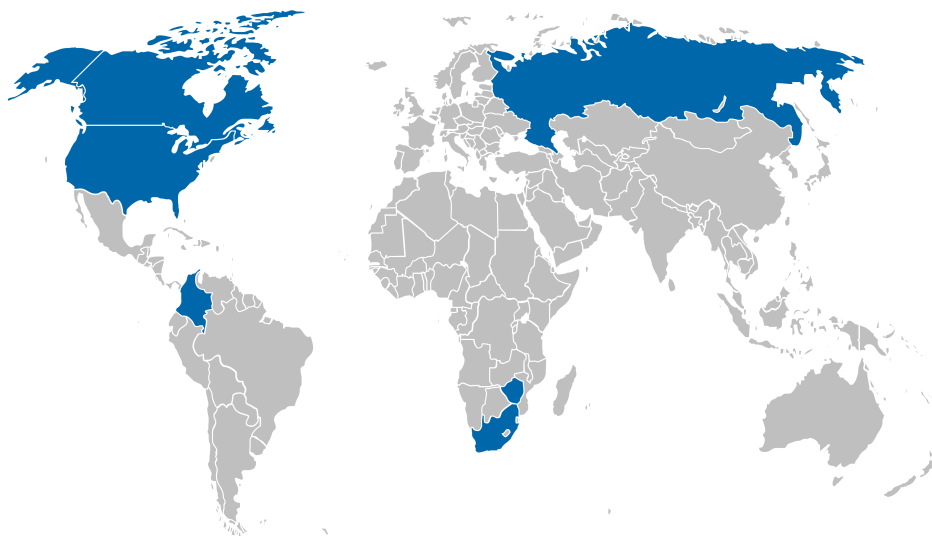


Abbildung 3.11: Größte Abbauländer der Platingruppenmetalle im Jahr 2010 [48], [Eigene Darstellung]

Marktkonzentration der Produktionsländer Im Jahr 2010 lag der HHI bei 6.106, was einem konzentrierten Markt entspricht, währenddessen er im Jahr 2009 noch geringfügig darunter bei 6.190 und im Jahr 2005 bei 6.256 lag. Der Rückgang ist auf den Ausbau der Produktion in Russland und Simbabwe, sowie einen Rückgang der Kapazitäten in Südafrika zurückzuführen.

Reserven, Ressourcen und Konzentration der Reserven Südafrika ist nicht nur das größte Abbauland von PGM, sondern meldete im Jahr 2010 mit 63 Mio.kg auch die größten Reserven. Dies entspricht 95,3 % der weltweit vorhandenen Reserven. Russland gibt seine Reserven mit 1.1 Mio.kg an, hat jedoch im Jahr 2008 noch 6.2 Mio.kg gemeldet. Das hat auch dazu geführt, dass die gemeldeten weltweiten Reserven zurückgegangen sind. Es ist aber anzunehmen, dass das nicht den Ist-Stand abbildet, sondern auf eine schlechte Datenqualität zurückzuführen ist [52]. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass die Verteilung der Reserven mit 9.088 äußerst konzentriert ist. Die Ressourcen werden weltweit auf 100 Mio.kg geschätzt.

Statische Reichweite und Ressourcenreichweite Mit den Werten für Produktion, Reserven und Ressourcen kann für das Jahr 2010 eine statische Reichweite von 343 Jahren und eine Ressourcenreichweite von 519 Jahren berechnet werden.

Nachfrage und Preis Die Nachfrage durch die Industrie hat dazu geführt, dass die Preise stark angestiegen sind. So ist der Preis von Palladium um mehr als 37,0 % im Jahr 2006 im Vergleich zum Vorjahr angestiegen, wobei aber auch der Platinpreis um 21,4 % gestiegen ist. Im Jahr 2009 sind dann die Preise für PGM durchgehend gefallen. Anfang 2010 hat sich die Nachfrage der Industrie wieder leicht erholt, wobei die Nachfrage durch die Schmuckindustrie noch immer gering ist. [52] Der Durchschnittspreis von Platin im Jahr 2010 lag bei 1.615,6 \$ pro Feinunze und von Palladium bei 530,6 \$ pro Feinunze.

Kapitel 4

Absatzentwicklung – Ermittlung des gesamten Fahrzeugabsatzes und Analyse der Kosten

Zur Abschätzung des Einflusses der Rohstoffe auf die unterschiedlichen Antriebskonzepte, stellt sich nun als nächstes die Frage, wie sich der Absatz der Fahrzeuge gestaltet. Wie schon zuvor besprochen, werden die Betrachtungsgrenzen bei der Herstellung der Fahrzeuge gezogen. Es wird daher keine Rücksicht auf mögliche Verfügbarkeiten von Ladestellen, etc. genommen.

Daraus leitet sich nun die Frage ab, welche Fahrzeuge in welcher Menge produziert werden. Es wird angenommen, dass alle bis 2030 produzierten Fahrzeuge mit einem der Antriebsstränge, wie sie in *Abschnitt 2.2* vorgestellt werden, ausgestattet sind.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, den gesamten weltweiten jährlichen Fahrzeugabsatz abzuschätzen (siehe *Abschnitt 4.1.3*). Aufbauend auf dem Fahrzeugabsatz kann dann geklärt werden, welche Fahrzeuge mit welchen Antriebssträngen hergestellt werden. Eine Herausforderung bei einem Ausblick auf die Zukunft stellt die Gegebenheit dar, dass mögliche nicht lineare Ereignisse bzw. Entwicklungen (zum Beispiel Technologiesprünge, Umwelteinflüsse, etc.) eintreten können.

Um die Absatzmenge, abhängig vom Antriebsstrang abschätzen zu können, müssen die Herstellkosten der einzelnen Fahrzeuge bestimmt werden. Die Vorgangsweise zur Ermittlung dieser Kosten wird in *Abschnitt 4.2* aufgezeigt.

Es werden daher zwei unterschiedliche Diffusionsmodelle entwickelt. Zunächst wird ein Nachfragemodell (siehe *Kapitel 5*) entwickelt, in dem auf Basis von Mark-

terhebungen und Kundenwünschen eine mögliche Entwicklung prognostiziert wird. Als weiteres Szenario, dem Angebotsmodell (siehe *Kapitel 6*), werden zunächst drei mögliche Diffusionsszenarien entwickelt, indem ein Sortiment an Antriebskonzepten im zeitlichen Verlauf vorgegeben wird. Dies soll ermöglichen, etwaige unerwartete Entwicklungen zu berücksichtigen und die Extrema abschätzen zu können.

4.1 Entwickeln einer Absatzprognose

Eine steigende Weltbevölkerung und der stetig steigende Wunsch nach Mobilität sind Indikatoren für einen wachsenden Fahrzeugbestand. Diese beiden Indikatoren sollen nun herangezogen werden, um in einer Absatzprognose zu bestimmen, wie viele Fahrzeuge insgesamt und unabhängig vom Antriebskonzept bis 2030 am Markt sein werden. Abgeleitet aus dieser Prognose kann angegeben werden, wie viele Fahrzeuge dafür jährlich produziert werden müssen.

4.1.1 Entwicklung der Weltbevölkerung

Zunächst wird die erwartete Entwicklung der Weltbevölkerung innerhalb des Betrachtungszeitraums bestimmt. Dazu wird die von den Vereinten Nationen (UNO) erstellte Prognose *WORLD POPULATION PROSPECTS: THE 2010 REVISION* [65] zur Entwicklung der Bevölkerung übernommen. Eine Zusammenfassung der Daten ist in *Abbildung 4.1* zu sehen¹. In der Prognose wird die weltweite Bevölkerung hinsichtlich ökonomischer Gesichtspunkte in drei Regionen

- Entwickelte Regionen²,
- weniger entwickelte Regionen³ und
- am wenigsten entwickelte Regionen⁴ unterteilt.

Wie in *Abbildung 4.1* dargestellt, wird die weltweite Bevölkerung von knapp sieben Milliarden im Jahr 2010 um etwa 21,7 % auf 8,5 Milliarden Menschen im

¹Eine detaillierte Aufstellung der Entwicklung der Weltbevölkerung ist im Anhang *Tabelle 10.2* zu finden.

²Entwickelte Regionen umfassen Europa, Nord Amerika, Australien, Neuseeland und Japan.

³Weniger entwickelte Regionen umfassen alle Regionen in Afrika, Asien (außer Japan), Lateinamerika und Karibik inklusive Melanesien, Micronesien und Polynesien.

⁴Wenigst entwickelte Regionen umfassen 49 Länder: 33 in Afrika, 9 in Asien, 5 in Ozeanien und jeweils eines in Latein Amerika und in der Karibik.

Jahr 2030 anwachsen, wobei die am wenigsten entwickelten Regionen mit 51,2 % das größte Wachstum aufweisen. Auch die wenig entwickelten Regionen, welche die BRIC-Länder⁵ umfassen, weisen ein Wachstum von 20,5 % auf 5,9 Milliarden Menschen 2030 auf. Die entwickelten Regionen zeigen, im Vergleich zu den anderen Regionen, ein geringes Wachstum von rund 7,0 % auf 1,4 Milliarden 2030 auf, im Vergleich zu 1,3 Milliarden Menschen 2010. Den größten Anteil der Weltbevölkerung stellen sowohl im Jahr 2010 mit 69,7 %, als auch im Jahr 2030 mit 69,0 % die wenig entwickelten Länder dar. Der Anteil der entwickelten Länder geht auf 16,2 % zurück.

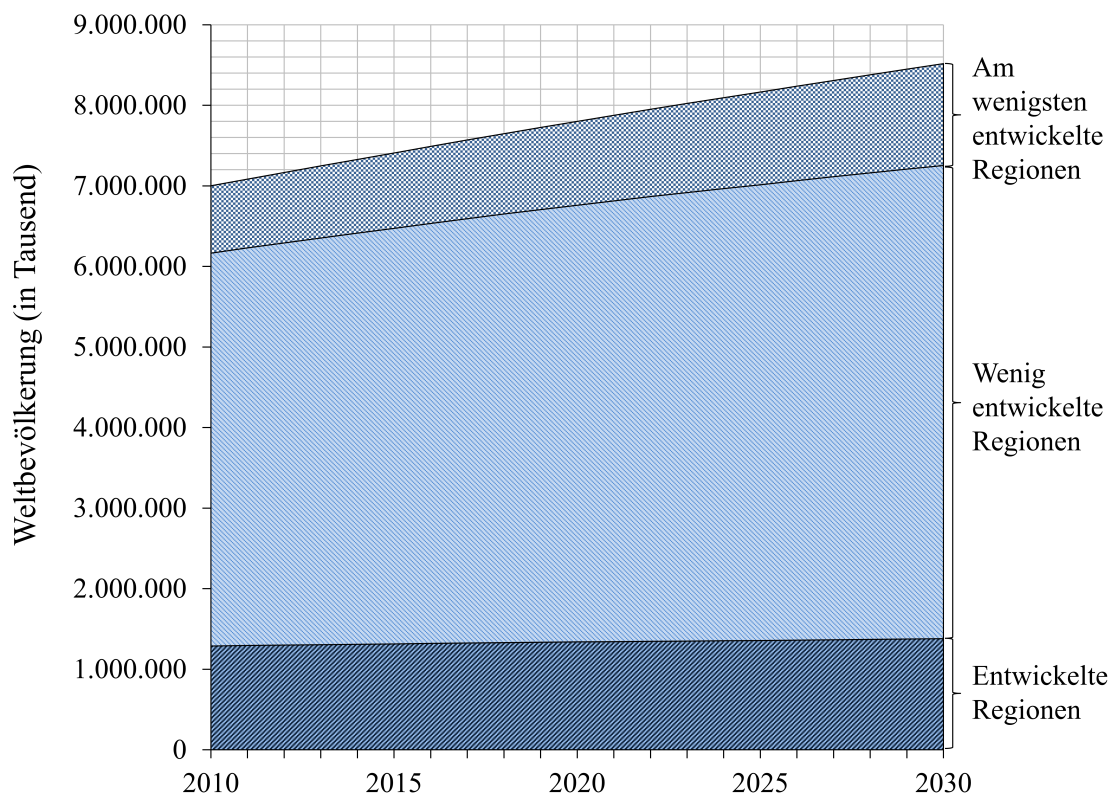


Abbildung 4.1: Entwicklung der Weltbevölkerung von 2010 bis 2030 [65], [Eigene Darstellung]

4.1.2 Entwicklung der Fahrzeugdichte

Als zweiter Indikator für die Entwicklung des Fahrzeugbestands wird der Wunsch nach steigender Mobilität herangezogen. Dazu dient zunächst aus Daten der Weltbank (siehe *Tabelle 4.1*) der durchschnittliche Fahrzeugbestand pro 1.000 Einwohner

⁵BRIC-Länder: Brasilien, Russland, Indien und China.

als Ausgangsbasis. Die im Kapitel zuvor angesprochene Unterteilung der Regionen durch die UNO wird nun wieder notwendig, da (1) abhängig von der Region das erwartete Wachstum unterschiedlich und (2) die Ausgangslage hinsichtlich der Fahrzeugdichte unterschiedlich ist.

Tabelle 4.1: Fahrzeugdichte von 2003-2009 in den verschiedenen Weltregionen [Fahrzeuge pro 1.000 Einwohner] [66], *[Eigene Berechnungen]

| | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | Durchschn. Wachstum |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|
| Entwickelte Regionen | 445,2 | 449,0 | 450,8 | 447,9 | 452,9 | 456,4 | 455,4 | 0,38%* |
| Weniger entwickelte Regionen | 34,8 | 34,2 | 36,8 | 39,0 | 50,1 | 47,1 | 50,1 | 6,73%* |
| Am wenigst entwickelte Regionen | 4,4* | 4,6* | 4,8* | 5,1* | 5,4 | 5,6* | 5,9* | 5,00%* |

Das in *Tabelle 4.1* angeführte durchschnittliche Wachstum der Fahrzeugdichte pro Region ist der Durchschnittswert des Wachstums der vorangegangenen Jahre. Unter Zuhilfenahme des Ausgangswerts und dessen Wachstum kann nun die Zunahme der Fahrzeugdichte bis zum Jahr 2030 bestimmt werden. Dazu wird ein lineares Wachstum angenommen, was bedeutet, dass das Wachstum jedes Jahr von 2010 bis 2030 um das durchschnittliche Wachstum der Jahre 2003 bis 2009 ansteigt.

Es ergibt sich so eine weltweite durchschnittliche Fahrzeugdichte von etwa 170 Fahrzeugen pro 1.000 Einwohner im Jahr 2010. Über das angeführte lineare Wachstum kommt es zu einer Dichte von 195,8 im Jahr 2020 und 235,4 Fahrzeuge pro 1.000 Einwohner im Jahr 2030. Durch das schwache Wachstum und die bereits hohe Sättigung steigt die Dichte in den entwickelten Regionen auf 493,3 Fahrzeuge, was einer Steigerung von etwa 36 Fahrzeugen bzw. 8 % bis 2030 entspricht. Bei den wenig entwickelten Regionen steigt die Dichte auf etwa 196,6 Fahrzeuge im Jahr 2030, was einer Vervierfachung des aktuellen Werts entspricht. Auch die am wenigst entwickelten Regionen zeigen ein Wachstum von knapp sechs Fahrzeugen auf 16,4 Fahrzeuge pro 1.000 Einwohner auf.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Fahrzeugdichte in den entwickelten Regionen im Vergleich zu den weniger entwickelten Regionen nicht mehr wächst bzw. nur sehr gering. Es kann davon ausgegangen werden, dass in einigen Ländern in den weniger entwickelten Regionen (z. B. Indien) sogar wesentlich größere

Zahlen zu erwarten sind.

4.1.3 Absatzprognose

Bevor man feststellt, wie viele Fahrzeuge pro Jahr produziert werden und so potenziell in Frage kommen, mit einem alternativen Antriebsstrang ausgestattet zu werden, muss der Fahrzeugbestandszuwachs ermittelt werden. Der Fahrzeugbestand im Jahr i errechnet sich aus der Fahrzeugdichte im Jahr i und der Weltbevölkerung im Jahr i . Der Zuwachs errechnet sich nun aus der Differenz des Bestands zweier aufeinander folgenden Jahre i (siehe *Formel 4.1*).

$$\text{Fahrzeugbestandszuwachs}_i = \text{Fahrzeugbestand}_i - \text{Fahrzeugbestand}_{i-1} \quad (4.1)$$

In *Abbildung 4.2* ist die Entwicklung des Fahrzeugbestands bis 2030 angeführt, gefördert durch die gestiegene Weltbevölkerung und Fahrzeugdichte. Ersichtlich ist, dass im Jahr 2010 rund 76 % aller Fahrzeuge in den entwickelten Regionen betrieben werden. Voraussichtlich ab der Hälfte des betrachteten Zeithorizonts wird es mehr Fahrzeuge in den weniger entwickelten geben, als in den entwickelten Regionen. Im Jahr 2030 ist davon auszugehen, dass etwa 63 % des weltweiten Fahrzeugbestandes in den wenig entwickelten Regionen vorzufinden sind. Auch der Bestand in den am wenigsten entwickelten Ländern wird im Jahr 2030 im Vergleich zu 2010 (etwa 20 Millionen Fahrzeuge) um fast 300 % steigen. Im Verhältnis zu den beiden anderen Regionen ist der Bestand aber dennoch sehr gering (1,1 %). Die Abschätzungen ergeben so, dass sich der weltweite Fahrzeugbestand im Jahr 2030 auf rund 2 Milliarden Fahrzeuge im Vergleich zu 2010 (854 Millionen Fahrzeuge) mehr als verdoppeln wird, was auch [67] bestätigt.

Um die Fahrzeugproduktion ermitteln zu können, muss nicht nur der Fahrzeugbestandszuwachs berücksichtigt werden, sondern auch jene Fahrzeuge, die verschrottet bzw. gegen ein neues Fahrzeug eingetauscht werden. Zusammengefasst bedeutet das, dass man einerseits Fahrzeuge produzieren muss, um den Bestandszuwachs zu gewährleisten und andererseits aber auch jene, die ausgetauscht werden auszugleichen. Dieser Austausch setzt sich durch die Tatsache zusammen, dass Fahrzeuge aufgrund von Unfällen oder Erreichen der maximalen Lebensdauer verschrottet werden. Für dieses Handlungen gibt es jedoch in der Literatur keine weltweit gültigen Zahlen. Die Ermittlung des jährlichen Fahrzeugtausches ist folglich nicht trivial möglich

und muss über Annahmen aus der Vergangenheit hergeleitet werden.

Dazu werden die tatsächlichen Produktionszahlen der Fahrzeugindustrie aus der Vergangenheit zuhelfe genommen, um so eine Projektion in die Zukunft durchführen zu können. Wie in *Formel 4.2* dargestellt, ist der Fahrzeugaustausch im Jahr i das Produkt aus dem Fahrzeugbestand und dem Austauschzuwachs, da bei mehr produzierten Fahrzeugen auch mehr Fahrzeuge ausgetauscht werden müssen. Die Berechnung des Zuwachses wird in *Formel 4.3* dargestellt. Er wird für die Jahre 2006-2010 berechnet, da es für diesen Zeitraum Daten zur weltweiten Fahrzeugproduktion gibt. Die Durchschnittsbildung über die vergangenen Jahren ist deswegen notwendig, um etwaige Schwankungen in der Produktion ausgleichen zu können.

$$Fahrzeugaustausch_i = Fahrzeugbestand_i * Austausch \quad (4.2)$$

$$Austausch = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \frac{Fahrzeugproduktion_i - Fahrzeugbestandszuwachs_i}{Fahrzeugbestand_i} \quad (4.3)$$

In *Tabelle 4.2* werden die Ergebnisse der Berechnung des Austauschs dargestellt. Die Daten für den Wert Fahrzeugproduktion werden aus Veröffentlichungen der INTERNATIONAL ORGANIZATION OF MOTOR VEHICLE MANUFACTURERS OICA übernommen. Die Berechnung des Fahrzeugzuwachses wird wie in *Formel 4.1* durchgeführt. Im Jahr 2007 kommt es zu einem negativen Austausch, da weniger Fahrzeuge produziert worden sind als der Bestand gewachsen ist. Dieser rasante Anstieg beim Bestand begründet sich durch die Tatsache, dass die Anzahl der Fahrzeuge pro 1.000 Einwohner in den wenig entwickelten Ländern im Jahr 2007 um mehr als 11 Fahrzeuge auf 50,1 Fahrzeuge zum Jahr 2006 angestiegen ist, um dann im Jahr 2008 wieder leicht (47,1 Fahrzeuge pro 1.000 Einwohner) zu sinken (siehe *Tabelle 4.1*). Zu erklären ist diese Differenz dadurch, dass die Fahrzeuge in einem Jahr produziert worden sind, aber erst im darauffolgendem Jahr auf den Markt gekommen sind und dass die Datenerfassung eine unbekannte Nachlaufzeit bzw. Qualität aufweist.

Die Fahrzeugproduktion setzt sich somit aus der Summe des Bestandszuwachses und dem Fahrzeugaustausch zusammen (siehe *Formel 4.4*).

$$Fahrzeugproduktion_i = Fahrzeugbestandszuwachs_i + Fahrzeugaustausch_i \quad (4.4)$$

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Berechnung des Austauschs (ohne Lastkraftwagen, Zweiräder, Pick-Ups etc.) [68]¹, [69]², [70]³, [71]⁴, [72]⁵, [Eigene Berechnungen]

| | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Fahrzeug- produktion | 49.918.578 ¹ | 53.201.346 ² | 53.025.081 ³ | 47.772.598 ⁴ | 58.242.327 ⁵ |
| Fahrzeug- bestands- zuwachs | 12.035.264 | 64.420.274 | -3.252.907 | 18.790.989 | 24.526.748 |
| Austausch | 5,0 % | -1,4 % | 6,9 % | 3,5 % | 3,9% |

Die nun prognostizierten Fahrzeugproduktionszahlen bis 2030 werden in *Abbildung 4.2* durch Balken dargestellt. Die Fahrzeugproduktion steigt auf 90 Millionen Fahrzeugen im Jahr 2020 an. Aufgrund der steigenden Bevölkerungsdichte und dem gestiegenen Mobilitätsbedürfnis, insbesondere in den wenig entwickelten Ländern wie etwa Brasilien, China oder Russland, lassen Produktionszahlen von rund 148 Millionen Fahrzeugen in 2030 ermitteln. Sowohl die Studie [22] als auch ein Interview mit Herrn Kalmbach in der Tageszeitung DIE ZEIT [73], der die Produktionszahlen mit bis zu 100 Millionen Fahrzeugen im Jahr 2020 einschätzt, bestätigen so die berechneten Produktionszahlen.

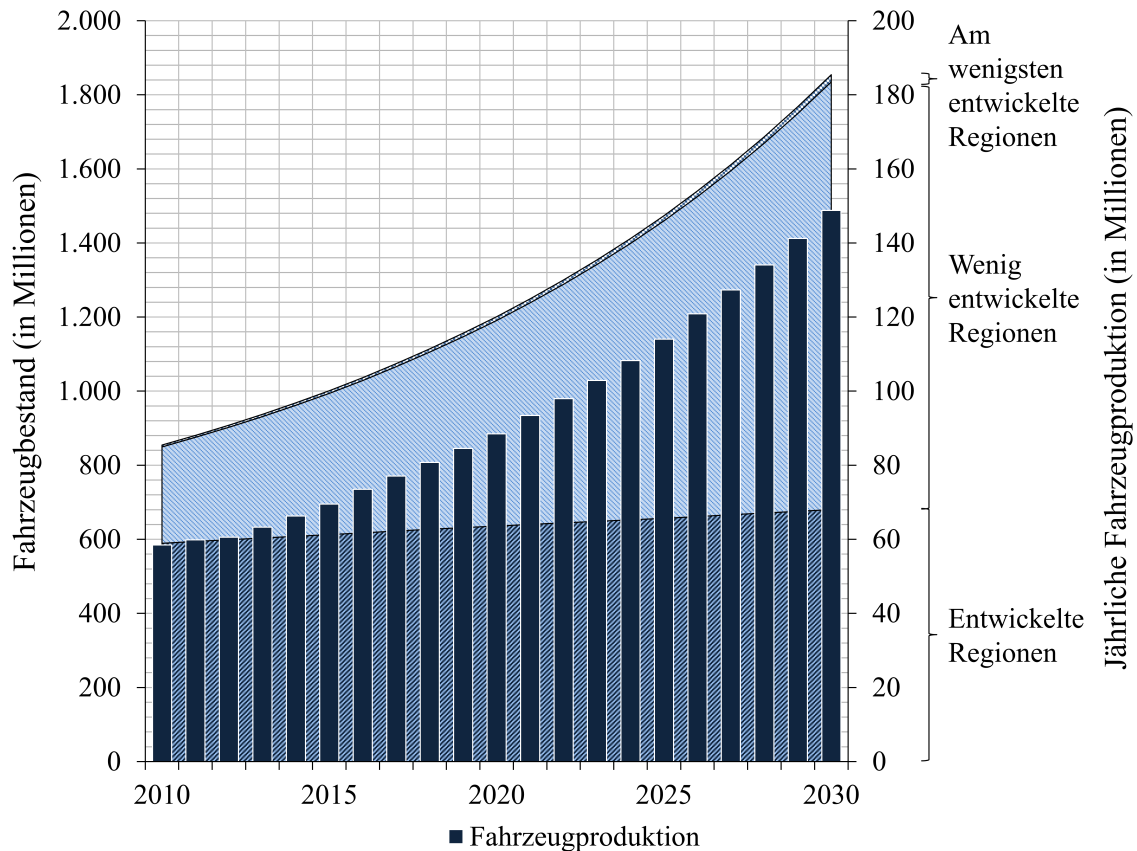


Abbildung 4.2: Entwicklung des weltweiten Fahrzeugbestandes bis 2030

Eine weitere Variante zur Ermittlung des Fahrzeugbestandes wäre eine Abschätzung der Entwicklung der Fahrzeugdichte in Abhängigkeit vom Bruttoinlandsprodukt (BIP). Von dieser Überlegung wird aber Abstand genommen, da wie in einem Beispiel über einen kurzen Zeitraum in *Tabelle 4.3* dargestellt, die Korrelation des Wachstums der Fahrzeugdichte zum Wachstum des BIP im betrachteten Periode nicht gegeben ist. In den entwickelten Regionen steht ein schwaches durchschnittliches Wachstum von 0,4 % bei der Fahrzeugdichte, einem durchschnittlichen Wachstum von 1,2 % beim Bruttoinlandsprodukt gegenüber. Bei den wenig entwickelten Regionen steht eine konstante positive Entwicklung beim BIP einer schwankenden Entwicklung bei der Fahrzeugdichte gegenüber. Des weiteren müsste man Prognosen zur Entwicklung des BIP benutzen, was zu einem weiteren möglichen Fehler führt.

Tabelle 4.3: Wachstum der Fahrzeugdichte pro 1.000 Einwohner in Abhängigkeit zum Bruttoinlandsprodukt [54], [66], *[Eigene Berechnungen]

| | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| Wachstum Fahrzeugdichte pro 1.000 Einwohner [%] | | | | | | |
| Europa | 0,4* | 4,8* | 1,4* | 1,8* | 1,4* | 0,6* |
| Entwickelte Regionen | 0,9* | 0,4* | -0,7* | 1,1* | 0,8* | -0,2* |
| Wenig entwickelte Regionen | -1,7* | 7,4* | 5,9* | 28,5* | -5,9* | 6,2* |
| Wachstum Bruttoinlandsprodukt [%] | | | | | | |
| Europa | 2,5 | 2,1 | 3,3 | 3,2 | 0,3 | -4,3 |
| Entwickelte Regionen | 3,0 | 2,4 | 2,8 | 2,5 | -0,1 | -3,9 |
| Wenig entwickelte Regionen | 7,7 | 7,4 | 8,4 | 9,0 | 6,0 | 2,0 |

4.2 Kostenentwicklungspotenziale

Eine Entwicklung der Kosten, in Abhängigkeit von den Produktionszahlen, ist eine Maßzahl für die Durchdringung des Marktes und deren Durchdringungsgeschwindigkeit. Die Herstellkosten der einzelnen Antriebskonzepte im Jahr 2010, die in der Studie ELEKTROMOBILITÄT - CHANCE FÜR DIE ÖSTERREICHISCHE WIRTSCHAFT [22] angeführt sind, dienen als Ausgangsdaten. In der Studie werden die Kosten auf Komponentenebene, abhängig von deren spezifischen Leistungen angegeben. Dies ermöglicht die Herstellkosten der Fahrzeuge, entsprechend den einzelnen Fahrzeugkonfigurationen wie sie in *Abbildung 2.10* bestimmt worden sind, ermitteln zu können. Dies führt zu den Herstellkosten im Jahr 2010 je Fahrzeugkonzept und Komponente, siehe *Tabelle 4.4*.

Die Kosten entsprechen nicht dem Preis. So stellt der Preis jenen Wert dar, den der Teilnehmer am Markt bereit ist für ein Gut zu zahlen (siehe *Abschnitt 1.2*). In den weiteren Berechnungen werden Kosten ermittelt, lediglich bei den Rohstoffen wird von Preisen gesprochen, nach dem sie auf dem Markt durch die Fahrzeughersteller gekauft werden müssen.

Die Herstellkosten werden in der Studie auf die spezifischen Leistungen und Eigenschaften des Antriebsstranges bezogen. Es gibt daher einen linearen Zusammenhang zwischen Komponentenkosten und Leistung. Da dies bereits normierte Werte aus der Literatur und Angaben von Experten sind, werden die berechneten Werte in der Tabelle gerundet. Auffallend sind die hohen Herstellungskosten für das Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV). Das liegt daran, dass es im Jahr 2010 und im Jahr 2013 noch in Prototypenserie ist und daher jedes Fahrzeug als Einzelanfertigung gezählt wird [22]. Das CV weist ebenfalls relativ hohe Kosten auf. Dieses ist darauf zurück

zu führen, dass unter diesem Konzept bereits ein Micro- und Mildhybrid verstanden wird (siehe *Abschnitt 2.2*). Auch die Antriebskonzepte PHEV, REX und BEV weisen höhere Herstellkosten auf als das CV. Das liegt vor allem an den Kosten für die Traktionsbatterie, jedoch gibt es auch Komponenten, die diesen Unterschied, durch Wegfall bzw. einfachere Bauweise, bis zu einem gewissen Anteil abfedern können.

Tabelle 4.4: Herstellkosten nach Antriebskonzepten im Jahr 2010 [€] [22], [Eigene Berechnung]

| | CV | PHEV | REX | BEV | FCEV |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| Verbrennungskraftmaschine | 2.500 | 1.700 | 400 | - | - |
| Elektromotor | - | 800 | 1.500 | 1.500 | 1.500 |
| Brennstoffzellen-Stack | - | - | - | - | 45.000 |
| Energiespeicher (ohne Traktionsbatterie) | 200 | 150 | 100 | 100 | 100 |
| Traktionsbatterie | - | 9.800 | 20.500 | 20.500 | 4.380 |
| Wasserstofftank | - | - | - | - | 42.000 |
| Steuer- und Leistungselektronik | - | 350 | 600 | 600 | 500 |
| Antriebsstrang | 700 | 700 | 200 | 200 | 200 |
| Thermo-Management | - | 600 | 600 | 600 | 600 |
| Abgasnachbehandlung | 900 | 300 | 100 | - | - |
| Unveränderte Komponenten | 10.000 | 10.000 | 10.000 | 10.000 | 10.000 |
| Summe | 14.300 | 24.400 | 34.100 | 33.600 | 101.300 |

Um den Einfluss der Rohstoffe auf die Herstellkosten der Fahrzeuge untersuchen zu können, müssen diese hinsichtlich ihrer Produktionsfaktoren (siehe *Formel 4.5*) aufgeteilt werden. Dazu werden die angegebenen Kosten der Komponenten auf Rohstoffkosten (Rohstoffe und Betriebsstoffe) und Fertigungskosten (Arbeit, Leitung und Planung) aufgeteilt.

$$y = y_E + y_D \quad (4.5)$$

mit

| | | |
|-------|------|----------------------|
| y | .... | Herstellkosten [€] |
| y_E | .... | Rohstoffkosten [€] |
| y_D | .... | Fertigungskosten [€] |

4.2.1 Rohstoffkosten

Die Rohstoffkosten pro Komponente sind das Produkt aus Rohstoffpreis und eingesetzter Rohstoffmenge. Die Summe aus den einzelnen Rohstoffkosten ergeben die gesamten Rohstoffkosten für das Fahrzeug (siehe *Formel 4.6*).

$$y_E = \sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^n r_r * u_k \quad (4.6)$$

mit

| | | |
|-------|------|---|
| y_E | .... | Rohstoffkosten [€] |
| r_r | .... | Preis des Rohstoffes r [€] |
| u_k | .... | Eingesetzte Menge des Rohstoffes r [kg] |
| r | .... | Anzahl an verbauten Rohstoffen [-] |
| k | .... | Anzahl an verbauten Komponenten [-] |

Die Bestimmung der Rohstoffkosten ermöglicht es nun, den Einfluss auf das einzelne Fahrzeug untersuchen zu können. Nachdem nur die Herstellkosten für die Komponenten im Jahr 2010 bekannt sind, jedoch nicht deren Aufteilung, muss diese zunächst berechnet werden. Dazu werden die Rohstoffkosten der Komponenten bzw. Fahrzeuge unter Heranziehung der Rohstoffpreise für das Jahr 2010 (siehe *Kapitel 3.3*) und den eingesetzten Rohstoffmengen berechnet. Diese Ergebnisse ermöglichen es nun auch, den Einfluss der Rohstoffkosten im zeitlichen Verlauf darstellen zu können.

4.2.2 Fertigungskosten

Der Beginn einer neuen Produktion ist immer von Unsicherheiten, mangelnder Erfahrung der Arbeitskräfte und Materialverschleiß geprägt. Wie schon in *Formel 4.5* angegeben, setzen sich die Herstellkosten aus Rohstoffkosten und Fertigungskosten zusammen. Die Kosten für die Rohstoffe, unterliegen keiner Lernkurve, wobei aber die Fertigungskosten sehr wohl einem Lerneffekt zu Grunde gelegt werden können. Dies bedeutet, dass mit steigenden Stückzahlen die Erfahrung steigt und die Fertigungstechnologien angepasst werden – von Einzelfertigung zur Massenfertigung, die

Kosten allerdings durch zum Beispiel kürzere Produktionszeiten, steigende Effizienz beim Materialeinsatz, etc. sinken. Dieser Effekt wird mittels Lernkurve (siehe *Formel 4.7*) beschrieben. Sie beschreibt die Kosten für das x-te Stück, in Abhängigkeit von den Herstellkosten für das erste Stück, der Output-Menge (was dem Absatz entspricht) und der Lernrate. Eine Lernrate von 80 % bedeutet, dass das zweite produzierte Stück 80 % des ersten Stücks, das vierte Stück nur mehr 80% des zweiten Stücks usw. kostet⁶. [6]

$$y_x = y_1 * x^{-b} \quad (4.7)$$

mit

| | | |
|-------|------|---|
| y_x | .... | Herstellkosten für das x-te Stück [€] |
| y_1 | .... | Herstellkosten für das erste Stück [€] |
| x | .... | kumulierte Output-Menge [Stück] |
| b | .... | Exponent für die Steigerungsrate, bestimmt durch die Lernrate [-] |

Nun unterliegen nicht alle Komponenten derselben Lernrate. Es müssen daher die Lernpotenziale auf der Komponentenebene berechnet werden und erst die Summe der Fertigungskosten ermöglicht es, die Fertigungskosten pro Fahrzeug zu ermitteln (siehe *Formel 4.8*).

$$y_D = \sum_{k=1}^n y_{k_1} * x^{-b_k} \quad (4.8)$$

mit

| | | |
|-----------|------|--|
| y_D | .... | Fertigungskosten pro Fahrzeugkonzept [€] |
| y_{k_1} | .... | Fertigungskosten je Komponente für das erste Stück [€] |
| x | .... | kumulierte Output-Menge [Stück] |
| b_k | .... | Lernrate abhängig von der Komponente [-] |

Die Formel setzt sich aus drei Teilen zusammen. Der erste Teil behandelt die Fertigungskosten für das erste Stück je Komponente. Diese sind aus den Herstellkosten für das Jahr 2010 zu errechnen, indem den Herstellkosten aus *Tabelle 4.4* die Rohstoffkosten berechnet für das Jahr 2010 abgezogen werden (siehe *Formel 4.9*).

⁶Voraussetzung für die Gültigkeit ist, dass Produktionskapazitäten sowohl beim Hersteller, wie auch bei den Zulieferern verfügbar sind und keine sprunghaften Fixkosten induziert werden.

$$y_{D_{2010}} = y_{2010} - y_{E_{2010}} \quad (4.9)$$

Wie bereits festgestellt, unterliegen nicht alle Komponenten derselben Lernrate. So gibt es Komponenten, die kaum oder gar keine Lerneffekte aufweisen, wie zum Beispiel Teile, die bereits im CV verbaut sind, andere weisen Lernraten von bis zu 15 % auf. In *Tabelle 4.5* werden die spezifischen Lernraten ausgewiesen. Nach einer gewissen Zeit erreicht die Kurve ein stabiles Maß. In [74] wird daher, um auch danach weitere Kostenentwicklungen aufzeigen zu können, ab dem Jahr 2020 eine jährliche Verbesserung, unabhängig von der Stückzahl, berechnet.

Tabelle 4.5: Kostenreduzierungspotenziale für E-Komponenten [74]

| | Lernrate [%] | Jährliche Verbesserung [%] |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| Verbrennungskraftmaschine | 0 | 0 |
| Elektromotor | 10,0 | 2,3 |
| Brennstoffzellen-Stack | 15,0 | 2,2 |
| Energiespeicher | 0 | 0 |
| Traktionsbatterie | 7,0 | 1,5 |
| Wasserstofftank | 15,0 | 2,2 |
| Antriebsstrang | 0 | 0 |
| Steuer- und Leistungselektronik | 10,0 | 2,3 |
| Thermo-Management | 0 | 1,5 |
| Abgasnachbehandlung | 0 | 0 |

Der letzte Teil der Formel – kumulierte Output-Menge – erfordert das Wissen über die hergestellte Stückzahl. Die Berechnung der Stück ist in *Kapitel 4.4* dargestellt.

4.3 Prognostizierte Preisentwicklung und Diffusionsentwicklungen

In den Abschnitten zuvor ist beschrieben worden, wie man die Kosten für die Fahrzeuge in Abhängigkeit von den eingesetzten Rohstoffmengen, den Rohstoffpreisen, der Lernrate und den produzierten Fahrzeugen berechnet. *Formel 4.10* fasst die in *Kapitel 4.2* gewonnenen Erkenntnisse nochmals zusammen.

$$y_i = \sum_{k=1}^n y_{k_1} * x^{-b_k} + \sum_{r=1}^m \sum_{k=1}^n r_r * u_k \quad (4.10)$$

Nun werden die Fahrzeugkosten in zwei Teile aufgeteilt. Der erste Teil, die Fertigungskosten, besitzt als dynamischen Anteil die Anzahl der produzierten Fahrzeuge. Die Berechnung dieser wird in *Kapitel 4.4* beschrieben. Der zweite Teil der Formel, die Rohstoffkosten, hat als dynamischen Faktor die Rohstoffpreise. Diese haben keinen direkten linearen Zusammenhang mit den produzierten Stückzahlen. In [37] und [42] werden acht Faktoren:

- Kartelle und regulatorische Veränderungen,
- zyklisches Verhalten von Angebot und Nachfrage,
- politische Risiken,
- Inflation und Deflation,
- Umwelteinflüsse,
- Angebot und Nachfrage,
- Verfügbarkeit und
- Finanz-Risiken

angegeben, die abhängig vom Rohstoff, unterschiedlichen Einfluss auf den Rohstoffpreis haben. Außerdem muss man berücksichtigen, dass annähernd alle Rohstoffe auch in anderen Geschäftsbereichen eingesetzt werden. Als Beispiel sei Kupfer angeführt, das in der Bauindustrie als Verkleidungen genauso eingesetzt wird, wie in der Elektrobranche als Stromleiter.

Ein direktes Abschätzen der Entwicklung des Einflusses der einzelnen Einflussfaktoren ist daher nicht möglich. Dies führt dazu, dass ein alternativer Weg gefunden werden muss, um die Fahrzeugherstellkosten in Abhängigkeit zu den Rohstoffpreisen darstellen zu können. Es werden daher im Folgenden Szenarien entwickelt, in denen mögliche Entwicklungen der Rohstoffpreise vorgegeben werden. Im ersten Szenario geht man davon aus, dass alle Rohstoffpreise auf dem Niveau vom Jahr 2010 bleiben. In den nächsten vier Szenarien – Szenario II bis V – geht man davon aus, dass die Preise aller Rohstoffe konstant ansteigen. Gefolgt von Szenario VI bis IX, in welchen es zu einem Absinken der Preise im Vergleich zum Jahr 2010 kommt. Abschließend wird in Szenario X davon ausgegangen, dass sich die Preise linear weiterentwickeln, entsprechend der jeweiligen Entwicklung der Rohstoffe von 2000 bis

2010. Angesichts der Tatsache, dass die Rohstoffpreise, wie in *Abschnitt 3.1* beschrieben, seit Beginn des 20. Jahrhunderts gesunken sind, erhalten Szenario I und VI-IX ihre Berechtigungen.

Szenario I: Rohstoffpreise auf dem Niveau des Jahres 2010 Im ersten Szenario bleiben die Rohstoffpreise bis 2030 auf demselben Niveau wie im Jahr 2010. Auf den ersten Blick entspricht diese Szenario nicht der Realität, jedoch wird auch keine Veränderung der Kaufkraft der Kunden berücksichtigt. Dieses Szenario würde daher bedeuten, dass sich die Rohstoffpreise gleich als die Inflation entwickeln würden.

Szenarien II-V: Anstieg der Rohstoffpreise Bei diesen Szenarien wird davon ausgegangen, dass alle Rohstoffpreise gleich stark ansteigen. Szenario II geht von einer jährlichen Steigerung von 1 % aus, Szenario III von 2 %, Szenario IV von 5 % und Szenario V von 10 % zum Niveau im Jahr 2010. Das bedeutet, dass die Rohstoffpreise schneller als die Inflation steigen.

Szenarien VI-IX: Absinken der Rohstoffpreise Ein Absinken der Rohstoffpreise, relativ zu den Fahrzeugkosten, wird ebenfalls untersucht. In Anlehnung an die Szenarien zuvor, sinken die Preise jährlich, im Szenario VI mit 1 %, Szenario VII mit 2 %, Szenario VIII mit 5 % und Szenario IX von 10 % zum Niveau im Jahr 2010.

Szenario X: Lineare Entwicklung der Rohstoffpreise Beim Szenario X entwickeln sich die Rohstoffpreise so wie die vergangenen Jahre. Das bedeutet, dass die jährliche Steigerungsrate pro Rohstoff dieselbe ist, wie die durchschnittliche Steigung in den Jahren 2000 bis 2010.

4.4 Simulation des Fahrzeugmarktes

Im vorangehenden Kapitel wird die Problematik angesprochen, dass sich die Kosten der Fahrzeuge in Abhängigkeit zu den produzierten Stück verändern. Wie viele Fahrzeuge insgesamt produziert werden und daher auch potenziell mit einem alternativen Antriebsstrang ausgestattet werden können, wurde bereits in *Kapitel 4.1.3* geklärt. Der Absatz pro Fahrzeugkonzept ist aber ausschlaggebend für die Herstellkosten und in einem weiteren Schritt wieder rückwirkend auf die zukünftig abgesetzte Menge. Geringe Kosten bedeuten höhere Absatzzahlen.

Das zuvor angesprochene Problem, dass die Kosten von der Absatzmenge abhängen, erschwert die Simulation des Fahrzeugmarktes. Es müssen daher zwei ergänzende Kriterien berücksichtigt werden:

1. Die abgesetzten Mengen bzw. die zu produzierenden Fahrzeuge pro Konzept hängen von den Kosten ab.
2. In Zukunftsbetrachtungen, sogenannten Forecasts, ist es nicht möglich, unerwartete Herausforderungen und Änderungen zu berücksichtigen. So könnte zum Beispiel ein technischer, aber auch finanzieller Breakthrough⁷ bei den Traktionsbatterien z. B. die Ladung der Batterie in wenigen Minuten, der aus heutiger Sicht noch nicht abschätzbar ist, dazu führen, dass der Absatz von Elektrofahrzeugen sehr schnell vorstatten geht.

Um die Potenziale nun optimal quantifizieren zu können, werden den folgenden Berechnungen zwei Modelle zugrunde gelegt. Im ersten, dem Nachfragemodell (siehe *Kapitel 5*), werden die Bedürfnisse der Kunden und mögliche technische Verbesserungen der Fahrzeuge berücksichtigt. Im zweiten, dem Angebotsmodell (siehe *Kapitel 6*), werden drei mögliche Fahrzeugwelten entwickelt, die man anschließend mit den Kundenanforderungen vergleicht.

⁷Ein Breakthrough ist ein aus momentaner Sicht nicht vorhersehbares Ereignis.

Kapitel 5

Nachfragemodell – Ermittlung der Absatzentwicklung

Im Nachfragemodell, werden die Entwicklung des Fahrzeugabsatzes unter Berücksichtigung der Kunden und deren Anforderungen, sowie technische Weiterentwicklungen ermittelt. Es werden aber lediglich lineare technische Verbesserungen berücksichtigt. Technologiesprünge kann man nicht abbilden.

Zunächst werden die Kundenbedürfnisse ermittelt, die ausschlaggebend für den Kauf eines Fahrzeuges bzw. für die Entscheidung für einen bestimmten Antriebsstrang sind. Schlagworte wie globale Erderwärmung, Peak-Oil, etc. führen auch bei den Kunden zu einem Umdenken. In vielen Diskussionen, die die Politik, Medien und Autohersteller zum Thema alternative Antriebe führen, wird dem Kunden und seinen Bedürfnissen zu wenig Beachtung geschenkt. Zwei eindrucksvolle Beispiele dazu waren der VW Lupo 1,2 TDI mit einem Durchschnittsverbrauch von drei Liter im NEFZ oder dem Schwestermodell, dem Audi A2. Die Kunden waren nicht bereit höhere Preise für ein Fahrzeug mit geringeren Verbrauch zu zahlen, was sich negativ auf die Verkaufszahlen auswirkte, sodass die Produktion schon bald wieder eingestellt werden musste [75]. Auch die kolportierten Einsparungen in der Nutzung konnten den Absatz nicht vorantreiben. Von Befürwortern von Elektrofahrzeugen wird oftmals das Argument hervorgebracht, dass der durchschnittliche Nutzer nur wenige Kilometer pro Tag fährt und diese könnten von jedem Elektroauto heute problemlos abgedeckt werden. Es ist noch immer der Kunde jener, der das Fahrzeug kaufen muss und somit sind dessen Bedürfnisse für den Kauf der Fahrzeuge ausschlaggebend.

5.1 Berechnungsmethode

Die Rahmenbedingungen, die der Kunde vorgibt, sind letztendlich entscheidend für den Absatz der Antriebskonzepte. Es stellt sich daher die Frage, was Anforderungen sind, die der Kunde an ein Auto stellt. Diese sind natürlich auf den ersten Blick sehr vielschichtig, es werden aber nur jene, die durch den Antrieb und den Energiespeicher bestimmt werden, in dieser Arbeit berücksichtigt. Unter Zuhilfenahme von Marktstudien [76], [77], [78], [79] konnten drei Faktoren – Anschaffungspreis, Reichweite und Ladedauer – ausgemacht werden, die als entscheidende Faktoren für die Kunden für die Anschaffung eines Fahrzeuges mit elektrifiziertem Antriebsstrang gelten. Einflussgrößen wie Fahrzeugfarbe oder Form werden nicht berücksichtigt, da davon auszugehen ist, dass diese Faktoren unabhängig vom Antriebskonzept gewählt werden. Weiters werden nur jene Faktoren in die Betrachtungen aufgenommen, die vom Kunden beeinflusst werden können. Wie in *Kapitel 1* besprochen, liegt der Fokus der Arbeit auf der Herstellung der Fahrzeuge. Auch das Nachfragemodell geht davon aus, dass zum Beispiel Parkplätze in ausreichender Menge vorhanden sind, es ein entsprechend dichtes Ladestellen- bzw. Wasserstofftankstellennetz gibt. Es wird daher angenommen, dass die angesprochene Verfügbarkeit und die Gesamtbetriebskosten keinen Einfluss auf die Kaufentscheidung haben.

Reichweite

Der Ruf nach der Alltagstauglichkeit von Fahrzeugen mit elektrischen Antrieben ist groß. Der erste entscheidende Faktor, ob die Kunden ein Fahrzeug mit alternativem Antriebsstrang kaufen, ist die Reichweite. Um die Reichweite, die pro Kilowattstunde Batterieinhalt zurückgelegt werden kann, zu bestimmen, werden die Erkenntnisse aus der Studie *BATTERIEELEKTRISCHE FAHRZEUGE IN DER PRAXIS* [23] herangezogen. In der Studie werden vier Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterie - Mitsubishi i-MiEV, Mercedes Benz A-Klasse E-Cell, Smart Fortwo Electric Drive, Nissan Leaf - unter kontrollierten Bedingungen miteinander verglichen. In *Kapitel 2.2* wurde definiert, dass im Rahmen der Arbeit lediglich Fahrzeuge der Golf-Klasse berücksichtigt werden. Es werden daher nur die Werte des Mercedes Benz A-Klasse E-Cell und des Nissan Leafs für die nachstehenden Überlegungen übernommen.

In *Tabelle 5.1* sind die Ergebnisse der Rollenprüfstandsuntersuchungen bei 20 °C Umgebungstemperatur angeführt. Die Distanzen divergieren, was aus den unterschiedlichen Batteriekapazitäten resultiert. Die Reichweite des Mercedes Benz ist mit 175 km über 70 % größer als die des Nissan, wobei aber auch die Batteriekapa-

azität mit 36 kWh um etwa 50 % größer ist. Daraus ergeben sich Durchschnittswerte für die Reichweite mit 138 km und eine Reichweite pro Kilowattstunde mit 4,5 km/kWh¹.

Tabelle 5.1: Reichweite von Elektrofahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterie [23], *[Eigene Berechnung]

| | Reichweite (bei 20 °C) [km] | Batterie- kapazität [kWh] | Reichweite/kWh [km/kWh] |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Mercedes Benz A-Klasse E-Cell | 175 | 36 | 4,86* |
| Nissan Leaf | 101 | 24 | 4,21* |
| Durchschnitt | 138* | | 4,53* |

In Abhängigkeit zu der zuvor definierten Fahrzeugklasse und den Fahrzeugkonfigurationen (siehe *Kapitel 2.2*) ergeben sich die Reichweiten für die Fahrzeuge:

- CV 900 km,
- PHEV 700 km,
- REX 250 km,
- BEV 106 km und
- FCEV 400 km [80].

Die Reichweite des REX ist jene, die es rein elektrisch und mit der Verbrennungskraftmaschine zurück legen kann. Die Angabe für das FCEV sind jene Angaben, die Mercedes Benz für sein Brennstoffzellenmodell B-Klasse F-Cell angibt.

Wie nun der Einfluss der Reichweite auf den Absatz von Fahrzeugen mit alternativem Antriebsstrang ist, kann durch die Berücksichtigung der Kundenakzeptanz abgeschätzt werden. In *Tabelle 5.2* sind die akzeptierten Kundenreichweiten aufgetragen. Etwa ein Viertel aller Personen würde eine Reichweite von 200 km akzeptieren, wobei 39 % es nicht akzeptieren würden, wenn das Fahrzeug nur 400 km weit fährt.

¹Es ist anzunehmen, dass kontinuierliche technische Entwicklungen diesen Wert innerhalb des Betrachtungszeitraums erhöhen.

Tabelle 5.2: Kundenakzeptanz – Reichweite [76], [77]

| Reichweite [km] | Kundenakzeptanz |
|-----------------|-----------------|
| 0-100 | 8 % |
| 0-150 | 14 % |
| 0-200 | 24 % |
| 0-300 | 39 % |
| 0-400 | 61 % |

Ladedauer

Als zweite Rahmenbedingung wurde die Ladedauer als ausschlaggebendes Kriterium für einen Kauf ermittelt. Zur Berechnung der Ladedauer der einzelnen Antriebskonzepte werden wieder die Erkenntnisse aus der Studie BATTERIEELEKTRISCHE FAHRZEUGE IN DER PRAXIS [23] herangezogen. Das Fahrzeug von Mercedes Benz benötigt für eine vollständige Ladung 927 Minuten, wobei der Nissan Leaf nur etwa die Hälfte der Zeit benötigt. So wie die unterschiedliche Reichweite ist auch die abweichende Ladezeit zu einem Teil durch die unterschiedlichen Batteriekapazitäten bedingt. Es wird daher zunächst die Ladedauer pro Kilowattstunde berechnet und der Durchschnitt für weitere Berechnungen herangezogen. Wie in *Tabelle 5.3* zu sehen ist, ergibt sich so ein durchschnittlicher Wert von 21,4 min/kWh²³.

Tabelle 5.3: Ladedauer von Elektrofahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterie [23],
*[Eigene Berechnung]

| | Ladedauer [min] | Batterie- kapazität [kWh] | Ladedauer/kWh [min/kWh] |
|-------------------------------|--------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Mercedes Benz A-Klasse E-Cell | 927 | 36 | 25,75* |
| Nissan Leaf | 407 | 24 | 16,96* |
| Durchschnitt | 667* | | 21,35* |

Unter Zuhilfenahme der durchschnittlichen Ladedauer kann man auf die Ladedauer der einzelnen Antriebskonzepte schließen. Bei den Antriebskonzepten CV, PHEV und FCEV lässt sich technologiebedingt die Befüllung der Tanks in wenigen Minuten durchführen. Die Konzepte REX und BEV haben als zentrales Element eine Batterie, die durch eine externe Stelle befüllt werden muss. Für diese Antriebskonzepte lässt sich die Ladedauer von etwa 8 Stunden und 40 Minuten berechnen.

²Durch den Einsatz alternativer Ladetechnologien (z. B. Schnellladung) sind auch schnellere Ladezeiten erzielbar.

³Es ist anzunehmen, dass kontinuierliche technische Entwicklungen diesen Wert innerhalb des Betrachtungszeitraums reduzieren.

Die durch die potenziellen Käufer akzeptierte Ladedauer wird in *Tabelle 5.4* aufgelistet. Daraus ist zu erkennen, dass 62 % der Käufer akzeptieren würden, wenn der Ladevorgang mehr als ein Stunde dauert. Auf der anderen Seite dulden 35 %, wenn die Ladedauer bis zu 5 Stunden beträgt.

Tabelle 5.4: Kundenakzeptanz – Ladedauer [77], [Eigene Berechnung]

| Ladedauer [min] | Kundenakzeptanz |
|-----------------|-----------------|
| 0-60 | 62 % |
| 0-120 | 59 % |
| 0-300 | 35 % |

Anschaffungspreis

Als letztes dieser Kriterien hat man den Anschaffungspreis identifiziert. Sie werden als eine der wichtigsten Kriterien [79] beim Kauf eines Fahrzeuges aus der Sicht des Kunden angegeben. In *Tabelle 5.5* ist die akzeptierte Differenz der Kunden zum CV angeführt. Sie zeigen, dass knapp die Hälfte der potenziellen Käufer nicht bereit ist, mehr als 1.000 € zusätzlich für ein Fahrzeug mit alternativem Antriebsstrang auszugeben. Bis zu 25.000 € würden noch immerhin 0,5 % der potenziellen Kunden ausgeben, jedoch ist kein nennenswerter Anteil bereit mehr zu zahlen.

Die Herstellkosten eines Fahrzeuges unterscheiden sich vom Verkaufspreis eines Fahrzeuges (siehe *Abschnitt 1.2*). Dafür gibt es mehrere Gründe (1) sind die Preise abhängig von der geographischen Lage in dem das Fahrzeug verkauft wird, (2) variieren sie abhängig vom Fahrzeughersteller und (3) werden die Preise durch diverse Gründe, zum Beispiel Marketing oder Positionierung auf dem Markt, verändert. Die weiteren Berechnungen werden aus der Sicht des Herstellers durchgeführt. Deswegen wird die Kostendifferenzen im Vergleich zum CV herangezogen.

Tabelle 5.5: Kundenakzeptanz – Anschaffungspreis [76], [77], [78], [Eigene Berechnung]

| Kostendifferenz [€] | Kaufbereitschaft |
|---------------------|------------------|
| 0-1.000 | 49,9 % |
| 1.001-2.500 | 34,6 % |
| 2.501-5.000 | 13,1 % |
| 5.001-10.000 | 2,1 % |
| 10.001-15.000 | 1,5 % |
| 15.001-20.000 | 1,0 % |
| 20.001-25.000 | 0,5 % |

Zusammenfassung der Entscheidungsfaktoren

Die zuvor beschriebenen Faktoren ergeben drei voneinander unabhängige Größen, die man für jedes Betrachtungsjahr bestimmt. Zur Ermittlung der Absatzzahlen im Nachfragemodell werden die Faktoren wie folgt miteinander verknüpft:

1. Im ersten Schritt wird die Reichweite für die einzelnen Antriebskonzepte für das betrachtete Jahr ermittelt. Über die in *Tabelle 5.2* angegebenen Werte kann man die Kundenakzeptanz für die ermittelte Reichweite bestimmen.
2. Analog zur Reichweite, kann man die Ladedauer je Fahrzeugkonzept und die Kundenakzeptanz ermitteln.
3. Zur Bestimmung der akzeptierten Kostendifferenz durch die Kunden müssen zunächst die Herstellkosten ermittelt werden. Die Berechnung dieser erfolgt wie in *Formel 4.10* vorgestellt. Eine Besonderheit der Herstellkosten stellt die Tatsache dar, dass sie abhängig von den bereits produzierten Stück sind. Es werden daher dazu die Absatzzahlen der Vorjahre herangezogen.
4. Anschließend müssen die Werte der Kundenakzeptanz miteinander multipliziert werden. Nach der Normierung der Werte auf 100 % und über die gesamten Fahrzeugproduktionszahlen (siehe *Abbildung 4.2*), können die Absatzzahlen je Fahrzeugkonzept für das betrachtete Jahr ermittelt werden.
5. Durch die Wiederholung dieser Vorgangsweise ab Punkt 1 für jedes Jahr innerhalb des betrachteten Zeitraums können Absatzzahlen und Herstellkosten ermittelt werden.

In den folgenden Kapiteln werden nun die Ergebnisse bei unterschiedlichen Rohstoffpreisen dargestellt.

5.2 Ergebnisse bei konstanten Rohstoffpreisen

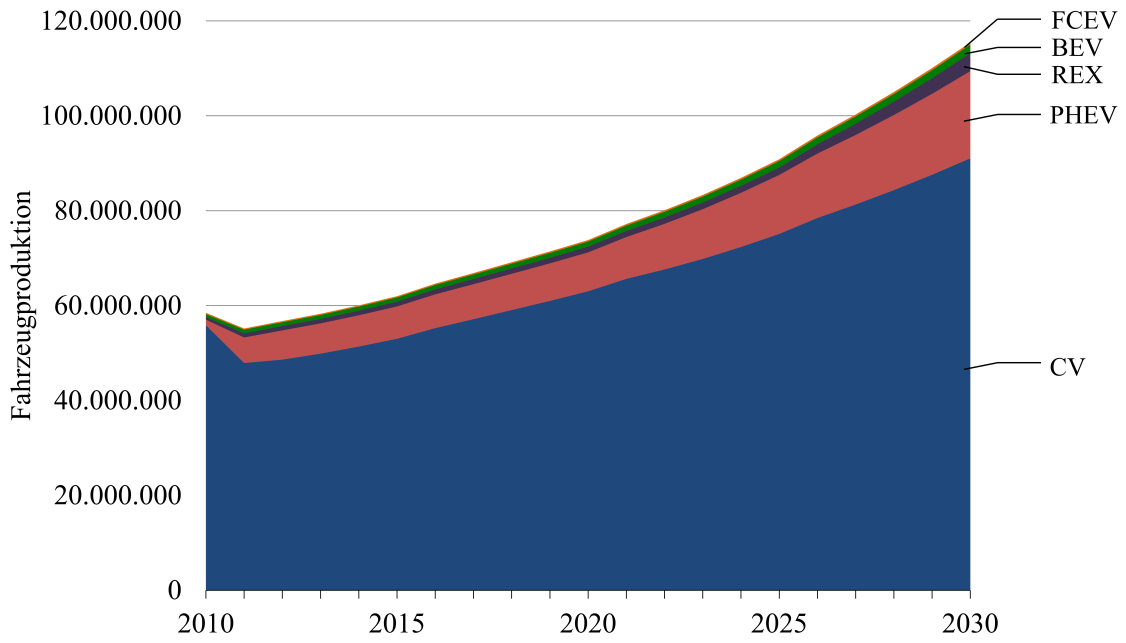
In *Abbildung 5.1* ist die Entwicklung des Fahrzeugabsatzes je Fahrzeugkonzept abhängig von den zuvor beschriebenen Faktoren und Rohstoffpreisen auf dem Niveau des Jahres 2010 in Szenario I (siehe *Abschnitt 4.3*) dargestellt. Die Herstellkosten des CV entwickeln sich unabhängig von den Absatzzahlen. Das liegt daran, dass keine Komponenten mit Lernrate im CV verbaut sind.

Anders sieht es beim PHEV aus, obwohl auch hier hauptsächlich Komponenten des CV verbaut sind. Die großen Entwicklungen der Lernraten sind im ersten Viertel des Betrachtungszeitraums zu erwarten. Sowohl die Reichweite als auch die Ladezeit stellen in diesem Konzept keine Restriktionen dar. Man kann daher davon ausgehen, dass der Anstieg der Absatzzahlen des PHEV ausschließlich auf die sinkenden Herstellkosten zurückzuführen ist. Die Kosten des PHEV sinken so auf etwa 18.5 Tsd. € bis 2030.

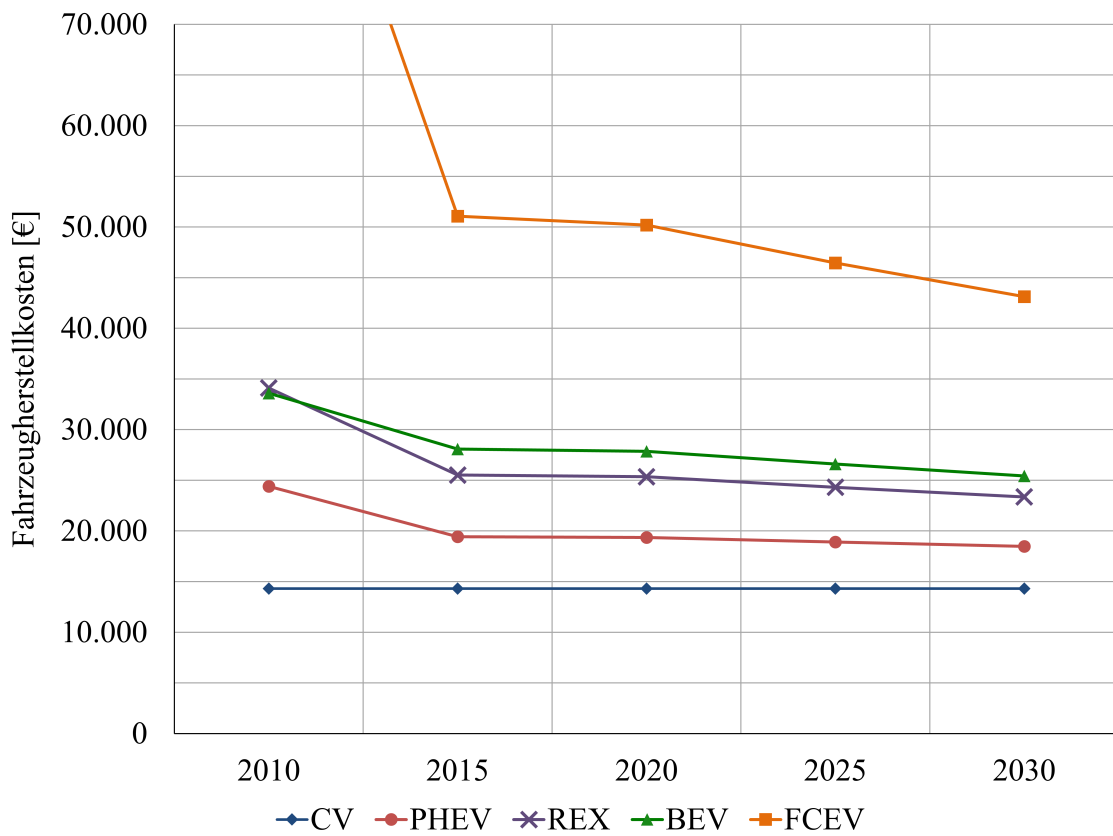
Neben den Herstellkosten sind bei REX und BEV sowohl Reichweite als auch Ladezeit beschränkende Faktoren. Das REX kann die Kundenanforderungen hinsichtlich der Reichweite von Anfang an besser erfüllen, was sich auch in höheren Absatzzahlen widerspiegelt. Dies führt zwangsläufig auch dazu, dass die Zahlen des BEV bis 2030 bei etwa der Hälfte des REX liegen werden. Dies hat auch Auswirkungen auf die Herstellkosten von REX und BEV. Zu Beginn der Erhebungen im Jahr 2010 sind die Herstellkosten des REX höher als die des BEV. Es zeichnet sich eine Änderung ab. Daraus ergeben sich für das Jahr 2030 Herstellkosten für das REX von 23.4 Tsd. € und 25.4 Tsd. € für das BEV.

Dem FCEV kommt zu Gute, dass durch die Kundenanforderungen hinsichtlich der Reichweite wie auch der Ladezeit keine Restriktionen zu erwarten sind. Auch wenn die Herstellkosten zunächst sehr hoch erscheinen und nur wenige Personen bereit wären, die Kosten zu tragen (siehe *Tabelle 5.5*), ist mit einem Sinken der Kosten zu rechnen. Im zweiten Viertel des Betrachtungszeitraums fallen die Kosten und die Stückzahlen steigen an, was dazu führt, dass die Kosten auf 43.1 Tsd. € bis 2030 absinken.

Am Ende der Betrachtungsperiode ist noch immer das CV das meist verkaufte Fahrzeugkonzept, jedoch wird auch das PHEV größere Produktionszahlen aufweisen. Danach folgt das REX und BEV, wobei eine entsprechende Verfügbarkeit vorausgesetzt wird. Das FCEV hat aufgrund der hohen Herstellkosten geringe Potenziale (0,4 % Anteil an der gesamten Absatzmenge im Jahr 2030). Über die Konzepte hinweg betrachtet, kann zusammengefasst festgestellt werden, dass jene Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschine eine dominante Rolle spielen und auch 2030 noch einen Marktanteil von etwa 95 % aufweisen.



(a) Fahrzeugproduktion



(b) Fahrzeugherstellkosten

Abbildung 5.1: Entwicklung der Fahrzeugproduktion und Herstellkosten in Abhängigkeit von gleichbleibenden Rohstoffpreisen (Szenario I)

5.3 Ergebnisse bei steigenden Rohstoffpreisen

Analog zum vorhergehenden Abschnitt werden nun die Auswirkungen der Herstellkosten und des Fahrzeugmarktes bei steigenden Rohstoffpreisen untersucht. Die Ergebnisse bei einem Steigen der Rohstoffpreise um 10 % werden in *Abbildung 5.2* dargestellt.⁴

Durch die Rohstoffpreise erfährt das CV einen Anstieg der Herstellkosten um etwa 8,0 % bis 2030 im Vergleich zum Jahr 2010, im Unterschied zu den anderen Antriebskonzepten, die alle einen Rückgang der Kosten im Vergleich zum Jahr 2010, aufweisen.

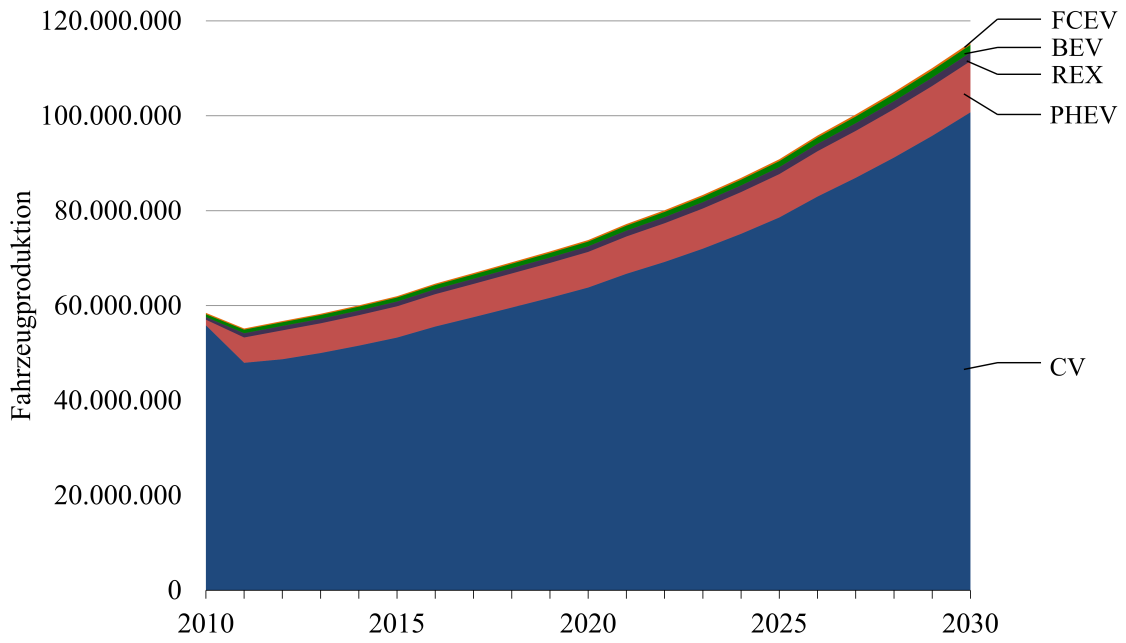
Das PHEV zeigt zunächst einen Abfall der Kosten, jedoch wirken die Rohstoffpreise dem Sinken der Kosten durch Lernen entgegen. Dies bedeutet, dass auch bei steigenden Absatzzahlen die Herstellkosten wieder anschwellen. Über die gesamte Betrachtungsperiode gesehen, werden die Herstellkosten im Jahr 2030 auch bei steigenden Rohstoffpreisen und die Kosten um 12,0 % unter denen von 2010 liegen.

Ähnlich der Entwicklung des PHEV sind auch die Verläufe der Herstellkosten des REX und BEV. Beide zeigen zunächst sinkende Kosten und anschließend eine annähernd konstante Entwicklung bis 2030, wobei die Herstellkosten des REX und BEV von 2010 auf 2030 um 12,0 % fallen. Insgesamt werden bis 2030 über den gesamten Betrachtungszeitraum gesehen, um etwa 3,8 Millionen REX mehr produziert werden als BEV.

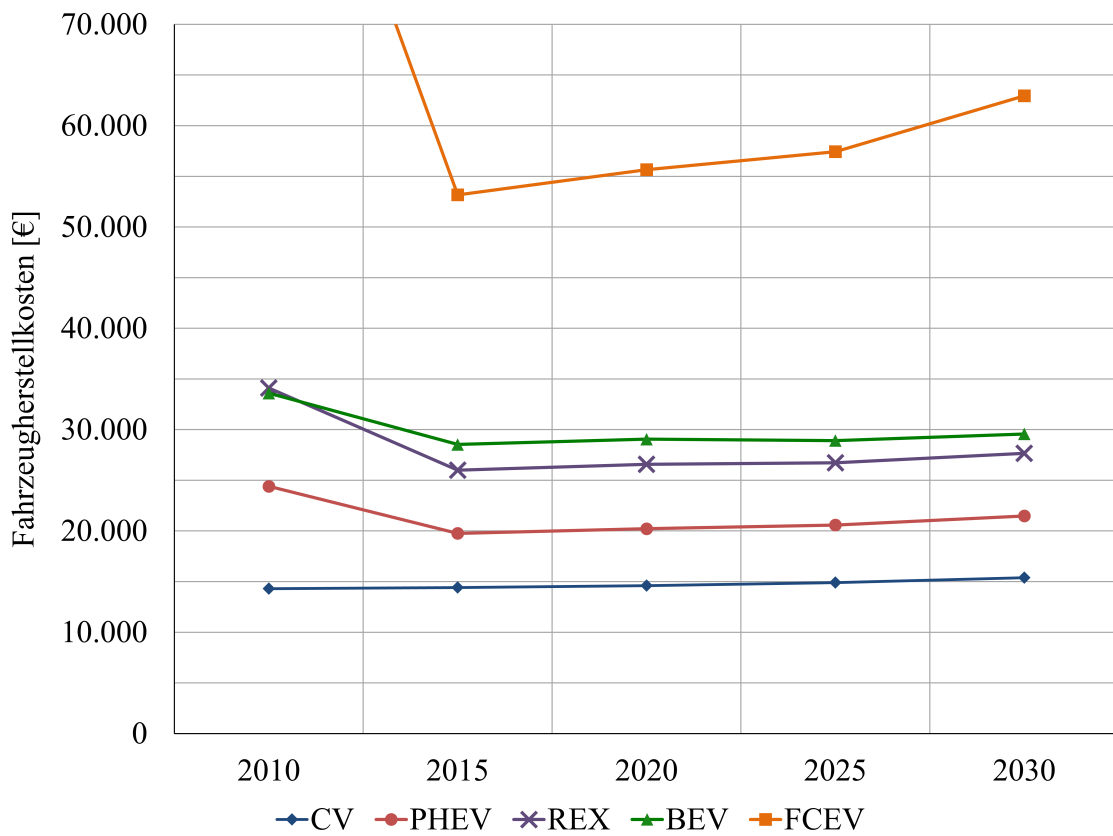
Das FCEV weist zunächst ebenfalls einen hohen Abfall bei den Herstellkosten auf, allerdings ist gegen Ende der ersten Betrachtungshälfte bei etwa 40.0 Tsd. € eine Wende zu erwarten und die Herstellkosten werden durch die steigenden Rohstoffpreise wieder auf etwa 63.0 Tsd. € bis 2030 anschwellen. Dies zeigt Auswirkungen auf die Absatzzahlen, insbesondere unter den Vorzeichen, dass in diesem Konzept die Reichweite und die Ladedauer keine beschränkenden Faktoren darstellen.

Zum Ende der Betrachtungsperiode sind CV und PHEV die beiden dominierenden Antriebskonzepte mit rund 96 % des gesamten Absatzes. Danach folgt das REX mit etwa 3 %. Dem BEV und FCEV werden kaum Chancen prognostiziert, wobei beim Batterie-Elektrischen-Fahrzeug alle drei Kundenfaktoren ihre Auswirkungen zeigen und beim FCEV ausschließlich die Kosten ein beschränkender Faktor sind.

⁴Die Ergebnisse bei geringer steigenden Rohstoffpreisen sind im Anhang zu finden.



(a) Fahrzeugproduktion



(b) Fahrzeugherstellkosten

Abbildung 5.2: Entwicklung der Fahrzeugproduktion und Herstellkosten in Abhängigkeit von steigenden Rohstoffpreisen (Szenario V)

5.4 Ergebnisse bei sinkenden Rohstoffpreisen

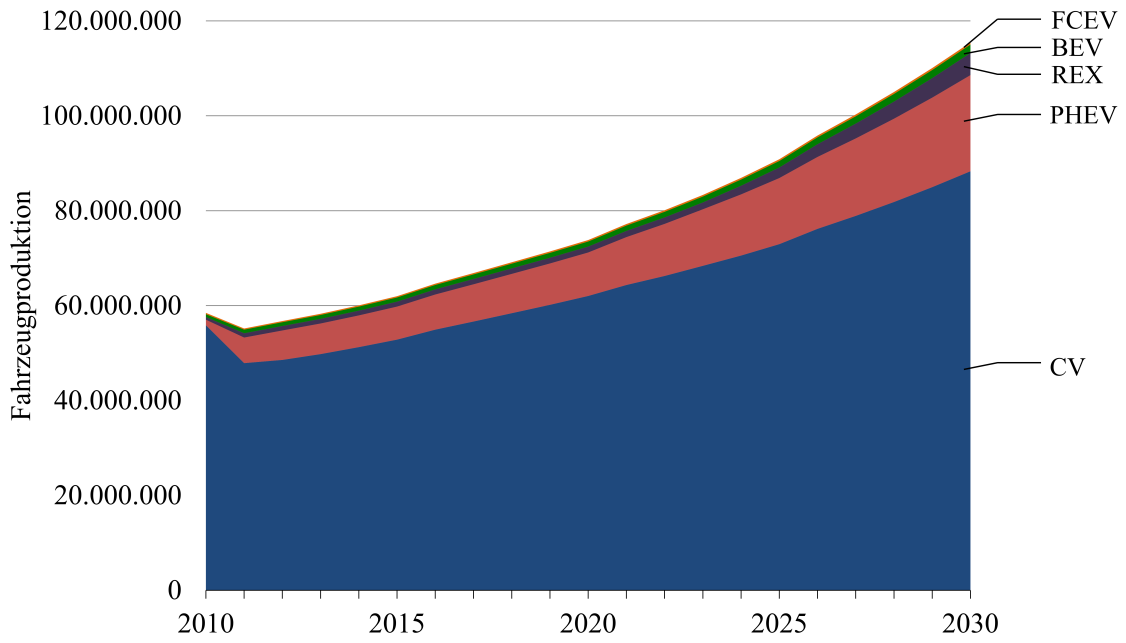
In *Abbildung 5.3* werden die Auswirkungen sinkender Rohstoffpreise auf den Fahrzeugabsatz abgebildet.⁵ Die leicht fallenden Herstellkosten (ca. 1,2 %) des CV sind auf die fallenden Rohstoffpreise zurückzuführen, im Unterschied zu den anderen Konzepten, bei denen auch die Lerneffekte, insbesondere zu Beginn ihre Auswirkungen zeigen. Beim PHEV führt das zu einem Sinken der Kosten auf unter 18.0 Tsd. € bis 2030 und im Folgenden zu hohen Produktionszahlen. Schon in der ersten Hälfte des Betrachtungszeitraums entsprechen die Produktionszahlen etwa 15 % denen des CV und zum Ende 23 %.

Auch hier weisen REX und BEV sinkende Fahrzeugherstellkosten auf, die zum Steigen des Absatzes dieser beiden Konzepte führen. Bis 2030 fallen die Kosten des REX auf etwa 22.7 Tsd. € und das BEV auf 24.8 Tsd. €. Das schnellere Sinken der Kosten des CV ist durch den höheren Absatz zu begründen.

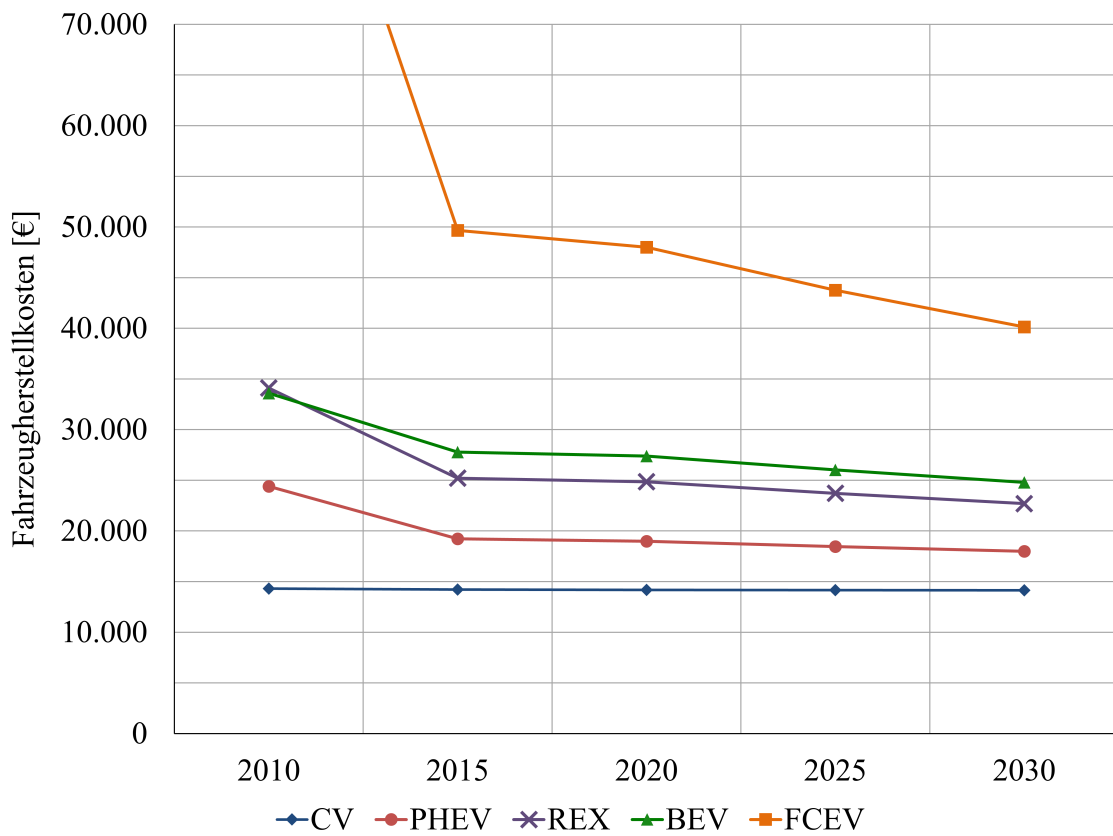
Das FCEV erfährt die größten Rückgänge bei den Herstellkosten, wobei ein Sinken der Kosten auf 48.0 Tsd. € bis zum Jahr 2020 zu erwarten ist. Dies führt wiederum zu einem Steigen der Absatzzahlen und in weiterer Folge zu einem Fallen der Herstellkosten bis 2030 auf unter 40.0 Tsd. €. Der Absatz kann so über die Jahre weiterhin gesteigert werden, wobei auch zum Schluss des Betrachtungszeitraums das FCEV aufgrund der hohen Kosten nur eine geringe Rolle spielt.

Auch bei sinkenden Rohstoffkosten kann davon ausgegangen werden, dass das CV das Konzept mit dem größten Absatz darstellt. Das PHEV folgt als Zweitstärkstes. Ein Überholen wäre möglich, sollte sich die Kostendifferenz noch weiter reduzieren. Obwohl die Kosten des REX und BEV fallen, sind die Absatzzahlen geringer einzuschätzen. Für die Kunden sind sowohl Reichweite als auch Ladedauer wesentliche Faktoren, die den Absatz merklich beeinflussen. Sinkende Rohstoffpreise können auch dem FCEV nicht dazu verhelfen, innerhalb des Betrachtungshorizonts nennenswerte Absatzzahlen zu erlangen.

⁵Die Ergebnisse bei geringer sinkenden Rohstoffpreisen sind im Anhang zu finden.



(a) Fahrzeugproduktion



(b) Fahrzeugherstellkosten

Abbildung 5.3: Entwicklung der Fahrzeugproduktion und Herstellkosten in Abhängigkeit von sinkenden Rohstoffpreisen (Szenario IX)

5.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem Nachfragemodell

Bei einer zusammenfassenden Betrachtung der Ergebnisse aus dem Nachfragemodell kommt man zu der Erkenntnis, dass Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschine im Antriebsstrang – CV, PHEV und REX – innerhalb des Betrachtungszeitraums der dominierende Energiewandler, unabhängig von den Entwicklungen der Preise der betrachteten Rohstoffe (siehe *Kapitel 3*), bleibt. Es wird aber zu einer Verschiebung vom CV zum PHEV hinsichtlich der Absatzzahlen bis 2030 kommen.

Jene Antriebskonzepte mit Verbrennungskraftmaschine – CV bis PHEV – werden bei steigenden Rohstoffpreisen sogar ihre Marktdominanz ausbauen. Unter anderem ist auch festzustellen, dass das REX sich als drittstärkstes Fahrzeugkonzept etabliert und das FCEV nur geringe Absatzzahlen aufweist.

Das BEV zeigt unabhängig von den Rohstoffpreisen nur geringe Absatzzahlen, da die Faktoren Reichweite und Ladedauer diese beschränken. Dem REX kommt hier zu gute, dass aufgrund der Verbrennungskraftmaschine höhere Reichweiten zu erzielen sind. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass die Kosten für die Kunden zwar ein wesentlicher Faktor sind, der Einfluss von Reichweite und Ladedauer jedoch keineswegs zu unterschätzen ist.

Kapitel 6

Angebotsmodell – Ermittlung der Herstellkosten

Im Angebotsmodell werden unabhängig von den Kundenwünschen mögliche Absatzmodelle vorgegeben. Dies ermöglicht, dass Entwicklungen unabhängig vom heutigen Wissen, wie Technologiesprünge, Einflussnahme durch Politik und noch nicht bekannte Kundenwünsche, berücksichtigt werden können. Weiters zeigt es mögliche Extrema auf und soll ein Spektrum möglicher Entwicklungen darstellen. In Anlehnung an [74] werden drei „Welten“ mit unterschiedlichen Schwerpunkten der Absatzverteilung definiert. Die Produktion steigt dazu konstant, von einer fast ausschließlich von Verbrennungskraftmaschinen dominierten Produktion, im Jahr 2010 zu einer den Szenarien entsprechenden Verteilung in 2030.

Szenario 1: Verbrennerwelt Die Fahrzeugproduktion wird weiterhin von Fahrzeugen mit einer Verbrennungskraftmaschine im Antriebsstrang dominiert. (83 % CV, 9 % PHEV, 2 % REX, 4 % BEV, 2 % FCEV)

Szenario 2: Elektrowelt Fahrzeuge mit einer Tendenz zu elektrischen Antrieben dominieren die Produktion. (50 % CV, 8 % PHEV, 6 % REX, 26 % BEV, 10 % FCEV)

Szenario 3: Wasserstoffwelt Abgeschlossen wird mit einer von Brennstoffzellenfahrzeugen fokussierten Produktion. (25 % CV, 10 % PHEV, 20 % REX, 15 % BEV, 30 % FCEV)

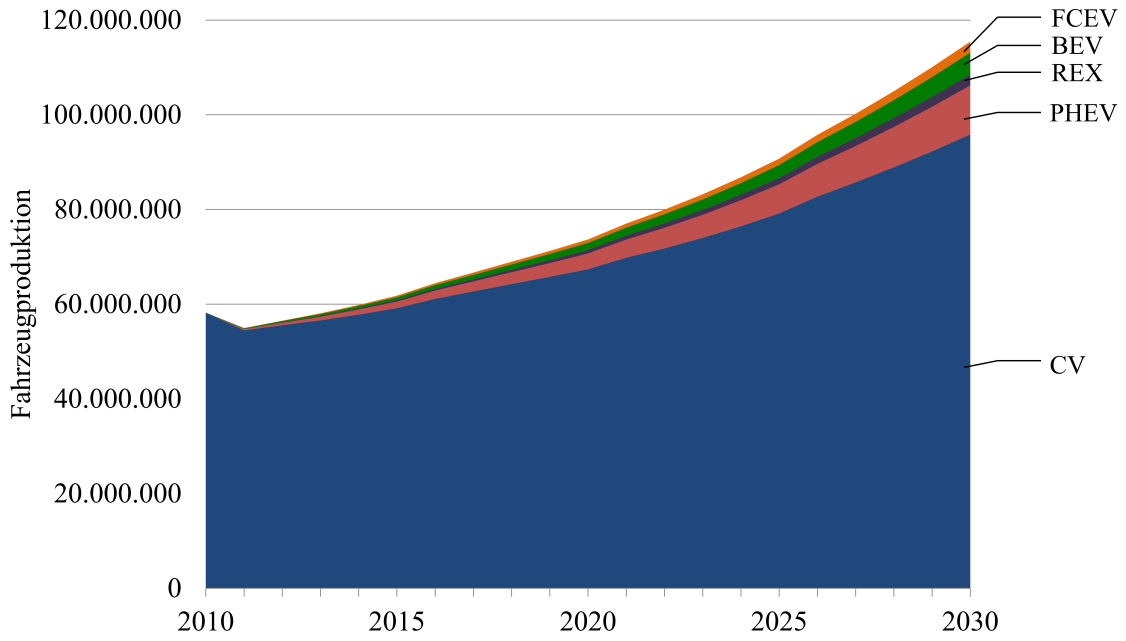


Abbildung 6.1: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Angebotsszenario (Szenario 1: Verbrennerwelt)

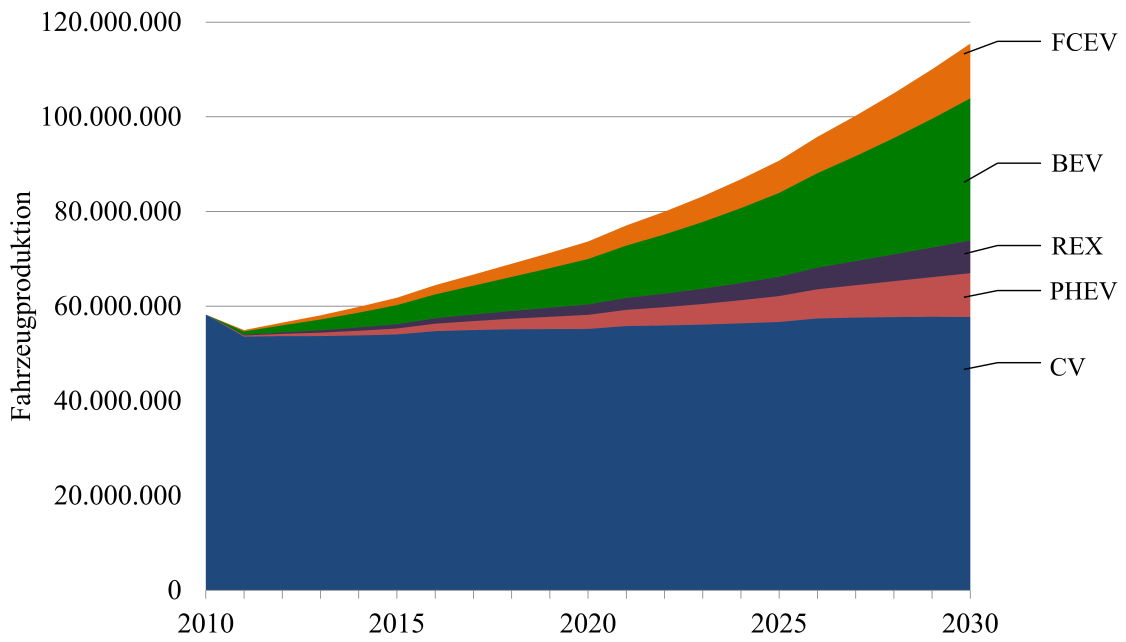


Abbildung 6.2: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Angebotsszenario (Szenario 2: Elektrowelt)

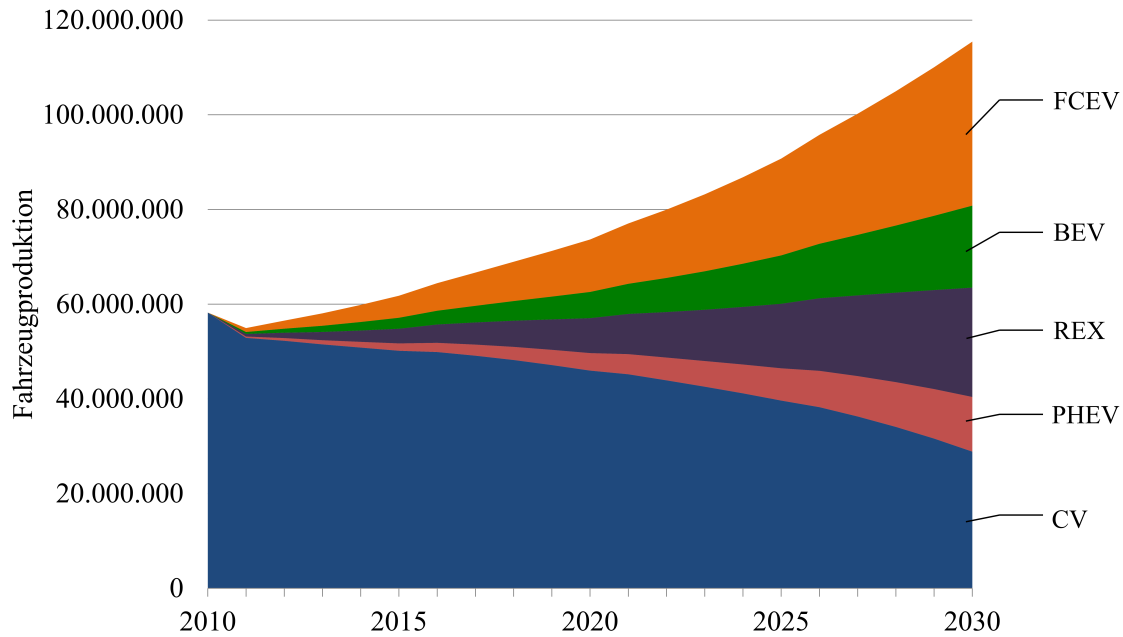


Abbildung 6.3: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Angebotsszenario (Szenario 3: Wasserstoffwelt)

Im Angebotsmodell wird der Markt durch die drei Szenarien – Verbrennerwelt, Elektrowelt und Wasserstoffwelt – simuliert. Der Fokus in diesem Kapitel liegt daher darauf, mögliche Fahrzeugherstellkosten bei vorgegebenen Fahrzeugabsatzzahlen und Rohstoffpreisentwicklung zu berechnen. Die *Abschnitte 6.1-6.3* besprechen die Entwicklungen der Herstellkosten bis 2030. Die Werte für das FCEV im Jahr 2010 werden in den Darstellungen nicht angegeben, da die Skalierung der Achsen größer gewählt werden müsste und damit die Lesbarkeit nicht gegeben wäre. In *Tabelle 4.4* können die Kosten für 2010 entnommen werden. Dargestellt wird der Verlauf der Kosten in Jahren bei unterschiedlichen Rohstoffpreisen. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Werte, inklusive der Kosten für die Traktionsbatterie und Brennstoffzelle, für jedes Rohstoffpreisszenario und Absatzszenario können den *Abbildungen 10.1-10.10* im Anhang entnommen werden.

6.1 Ergebnisse bei konstanten Rohstoffpreisen

Zunächst wird die Entwicklung der Fahrzeugherstellkosten im Angebotsmodell bei konstanten Rohstoffpreisen (Szenario I - siehe *Abschnitt 4.3*) besprochen. *Abbildung 6.4* zeigt den Kostenverlauf der Fahrzeuge in den drei verschiedenen Welten im Betrachtungszeitraum. Da die Rohstoffpreise konstant sind, werden die darge-

stellten Kostenverläufe ausschließlich durch eine Veränderung der Fertigungskosten bestimmt (siehe *Abschnitt 4.2.2*).

Im zeitlichen Verlauf zeigen die Herstellkosten des konventionellen Fahrzeuges (CV) keine Veränderung in allen drei Welten. Das liegt daran, dass keine Komponenten eingesetzt werden, die einer Lernrate unterliegen (siehe *Tabelle 4.5*). Daraus lässt sich schließen, dass die Kosten nicht mehr mit steigenden Stückzahlen sinken.

Das Plug-In Hybrid Fahrzeug, das dem CV am ähnlichsten ist (siehe *Kapitel 2*), zeigt eine Reduktion der Herstellkosten in der Verbrennwelt um 20,9 % bis 2020 und um 24,5 % bis 2030 im Vergleich zum Jahr 2010. Ähnlich dazu zeichnet sich auch die Entwicklungen mit einem Rückgang von 20,8 % (2020) und 24,4 % (2030) in der Elektrowelt ab, sowie in der Wasserstoffwelt von 21,1 % (2020) und 24,7 % (2030), immer bezogen auf das Jahr 2010. Die Reduktion der Kosten ist lediglich auf den Rückgang der Herstellkosten von E-Komponenten zurückzuführen.

Das Range-Extender-Fahrzeug und das Batterie-Elektrische-Fahrzeug zeigen in allen drei Welten ähnliche Verläufe auf. Es zeigt sich, dass (1) die Herstellkosten des REX im Jahr 2010 geringfügig höher als die des BEV sind und (2), obwohl in der Wasserstoffwelt geringfügig mehr REX als BEV produziert werden, dass die Herstellkosten des REX sowohl im Jahr 2020 als auch 2030 nicht unter denen des BEV liegen. Dies liegt an der angewendeten Berechnungsmethode der Lerneffekte (siehe *Formel 4.8*), die besagt, dass die Kosten bei jeder Verdoppelung der produzierten Stück um die Lernrate geringer sind, also einen negativen exponentiellen Verlauf haben (siehe *Abschnitt 4.2.2*). Nachdem nun im Jahr 2010 schon mehr BEV als REX produziert wurden, sind die Lerneffekte der ersten produzierten Stücke größer und führen zu den geringfügigen Unterschieden.

Die Tendenz, dass die Herstellkosten von 2010 auf 2030 zurückgehen, werden im Vergleich zu allen anderen Antriebskonzepten, beim Brennstoffzellenfahrzeug die größten Potenziale auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das FCEV im Jahr 2010 noch einen Prototypenstatus besitzt und durch die Lernraten der eingesetzten wasserstoffspezifischen Komponenten hohe Potenziale zu realisieren sind. In der Wasserstoffwelt kann so berechnet werden, dass die Herstellkosten im Jahr 2030 auf etwa 23,6 % (24.6 Tsd. €) der Kosten von 2010 zurück gehen werden. Auch in der Verbrennerwelt ist ein Rückgang um 72,0 % (29.3 Tsd. €) und in der Elektrowelt um 74,8 % (26.3 Tsd. €) festzustellen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in allen drei Welten und bei allen betrachteten Antriebskonzepten, außer dem CV, ein Rückgang der Herstellkosten zu verzeichnen ist. Es ist nicht zu erwarten, dass bei einer steigenden Tendenz zu

einem Antriebskonzept (BEV in der Elektrowelt und FCEV in der Wasserstoffwelt), das Fahrzeugkonzept unter die Herstellkosten des CV fällt. Auch wird der Kostenrückgang in der ersten Hälfte des Betrachtungszeitraums größer sein (2010-2020) als in der zweiten Hälfte (2020-2030).

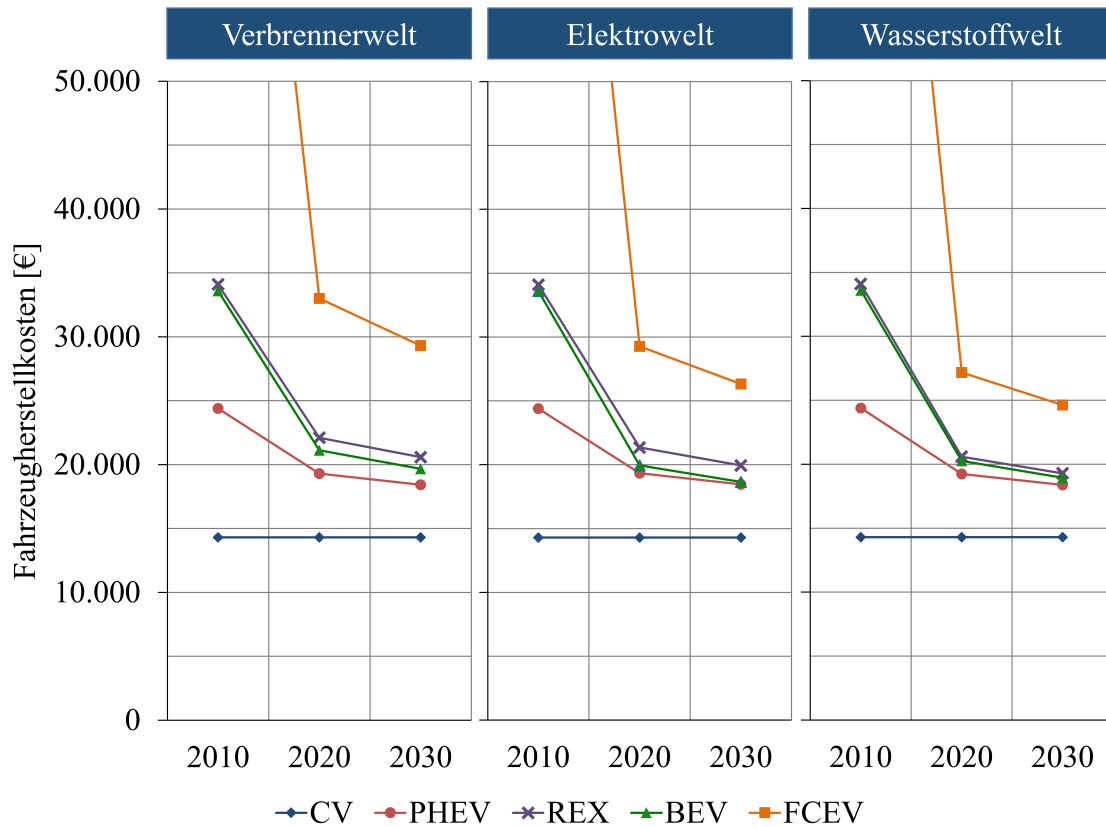


Abbildung 6.4: Entwicklung der Fahrzeugkosten in Szenario I

6.2 Ergebnisse bei steigenden und sinkenden Rohstoffpreisen

Dieser Abschnitt beschreibt ebenfalls den Verlauf der Herstellkosten, so wie im Abschnitt zuvor. Allerdings werden nun auch die Rohstoffkosten (siehe *Abschnitt 4.2.1*), die durch die Preise der Rohstoffe und den eingesetzten Mengen der Rohstoffe pro Fahrzeugkonzept gesteuert werden, variiert. Die Menge der Rohstoffe wird im zeitlichen Verlauf konstant gehalten, lediglich die Rohstoffpreise werden verändert.

Abbildung 6.5 zeigt den Verlauf der Herstellkosten der Fahrzeuge im zeitlichen Verlauf bei einem Anstieg der Rohstoffpreise und in *Abbildung 6.6* werden die Fahr-

zeugherstellkosten bei sinkenden Rohstoffpreisen dargestellt. Beim Anstieg bzw. Sinken der Rohstoffpreise wird, wie in *Abschnitt 4.3* beschrieben, in vier Szenarien – Anstieg der Preise um 1 %, 2%, 5 % und 10 % pro Jahr bzw. Sinken um 1 %, 2%, 5 % und 10 % pro Jahr – unterschieden. Aufgrund der besseren Lesbarkeit werden in den Diagrammen in diesem Kapitel lediglich der Anstieg bzw. das Absinken der Herstellkosten um 10 % als strichlierte Linien dargestellt und als durchgezogene Linien die vergleichbaren Kosten ohne Rohstoffpreisveränderung.¹

Ein Anstieg der Rohstoffpreise zeigt auch Auswirkungen auf das CV. Die Fahrzeuge würden in allen drei Welten bis 2030 um 7,6 % teurer werden. Am teuersten wäre das Fahrzeug bei einem Anstieg der Rohstoffpreise um 10 %, wobei der Unterschied der Herstellkosten bei diesem Fahrzeugkonzept ausschließlich auf die Rohstoffpreise zurückzuführen ist. Die Erkenntnisse aus *Abschnitt 6.1* haben gezeigt, dass sich die Herstellkosten des CV durch gestiegene Stückzahlen nicht verändern.

Das PHEV zeigt in allen drei Welten zunächst einen Rückgang der Herstellkosten, was darauf schließen lässt, dass das Sinken der Fertigungskosten bis 2020 größer als die Rohstoffkosten ist. Dies dreht sich jedoch um und die Herstellkosten steigen an. Im Mittel ist auch ersichtlich, dass die Kosten im Jahr 2020 und 2030 unter denen des Jahres 2010 bleiben. In der Verbrennerwelt ist bis 2030 ein Rückgang von 12,2 % zu erwarten. Auch in den beiden anderen Welten ist ein Rückgang der Herstellkosten im Schnitt von 12,2 % in der Elektrowelt und 12,5 % in der Wasserstoffwelt festzustellen.

Im Fall, dass die Rohstoffpreise pro Jahr um 10 % anziehen, würde das bedeuten, dass alle Rohstoffpreise bis 2030 um mehr als das Sechsfache des Preises von 2010 gestiegen sind. Die Herstellkosten des REX steigen dadurch bis 2030 um 27,1 % in der Verbrennerwelt, 29,0 % in der Elektrowelt und 30,9 % in der Wasserstoffwelt. Ein ähnliches Bild zeichnet sich bei den Kosten des BEV ab, welche um 29,3 % in der Verbrennerwelt, 32,3 % in der Elektrowelt und 31,4 % in der Wasserstoffwelt abfallen würden.

Die Fahrzeugherstellkosten des FCEV fallen zunächst stark ab und steigen dann in allen drei Welten wieder bis 2030 an. Der Knick findet bei unterschiedlichen Herstellkosten statt. In der Verbrennerwelt fallen die Kosten zunächst auf 38.5 Tsd. €, in der Elektrowelt auf 34.8 Tsd. € und auf 32.7 Tsd. € in der Wasserstoffwelt. Danach sinken sie bis 2030 um 4,2 % auf 33.0 Tsd. € in der Verbrennerwelt, um 2,3 % auf 30.0 Tsd. € in der Elektrowelt und um 1,0 % auf 28.4 Tsd. € in der Wasserstoffwelt.

¹Die detaillierten Ergebnisse der Entwicklungen der Fahrzeugherstellkosten bei unterschiedlichen Rohstoffpreisen werden im Anhang angeführt.

Der prozentual höhere Rückgang in der Verbrennerwelt ist darauf zurückzuführen, dass die Potenziale durch die Lerneffekte noch nicht voll ausgeschöpft wurden sind. In den beiden anderen Welten können diese, aufgrund der höheren Stückzahlen, schon vor 2020 realisiert werden.

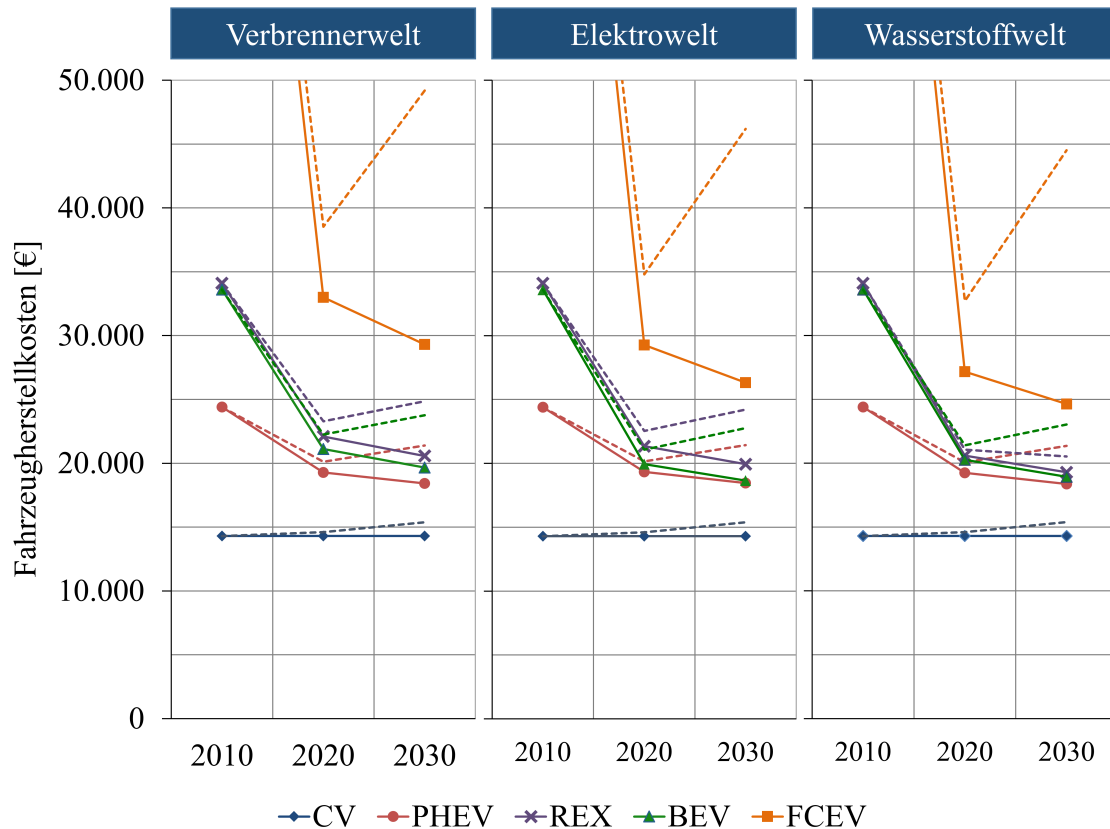


Abbildung 6.5: Entwicklung der Fahrzeugkosten in Szenario V

Die Auswirkungen fallender Rohstoffpreise auf die Herstellkosten werden in *Abbildung 6.6* dargestellt. Auffallend ist hier zunächst, dass man annehmen kann, dass sinkende Rohstoffpreise weniger Einfluss als steigende Preise haben. Dies liegt daran, dass sich der Rohstoffpreis pro Jahr durch eine jährliche Steigerung bzw. Abfallen, siehe *Abschnitt 4.3*, berechnet. Das bedeutet eine Veränderung des Rohstoffpreises um einen gewissen Prozentsatz im Vergleich zum Vorjahr. Das impliziert aber auch wiederum, dass die Preise schneller ansteigen als sie abfallen.

Die Herstellkosten des CV zeigen bei einem Abfall der Rohstoffpreise in allen drei Welten dieselben Ergebnisse. Die Fahrzeugherstellkosten würden sich bei einem Rohstoffpreiserückgang von 10 % um etwa 1,2 % reduzieren, wobei der Rückgang der Kosten ausschließlich durch ein Sinken der Rohstoffpreise begründet ist und nicht durch eine Reduktion der Fertigungskosten.

In allen drei Welten gehen die Herstellkosten für das PHEV bis 2020 unter die 19.0 Tsd. € Marke. Danach ist die Abnahme geringer. Die Kosten werden jedoch weiterhin bis 2030 unter 18 Tsd. € fallen. Am geringsten sind die Kosten des PHEV 2030 in der Wasserstoffwelt mit einem Rückgang um 25,7 % im Vergleich zum Jahr 2010, bedingt durch die höchste Absatzrate. Insgesamt werden sich die Kosten in allen drei Welten bei 18.0 Tsd. € einpendeln.

Beim REX zeigt sich bis 2030 der größte Rückgang in der Wasserstoffwelt, wobei das BEV das in der Elektrowelt aufzeigt. Das ist aber durch die unterschiedlichen Produktionszahlen der beiden Konzepte zu erklären. Der Einfluss der Rohstoffe ist bei beiden Konzepten sehr ähnlich. Im Schnitt gehen in allen drei Welten die Rohstoffkosten um 0,4 Tsd. € zurück. Beim REX und BEV machen die Rohstoffkosten im Jahr 2030 in der Verbrennerwelt 1,8 %; 1,9 % in der Elektrowelt und ebenfalls 1,9 % in der Wasserstoffwelt der gesamten Herstellkosten aus.

Das FCEV zeigt in der Elektrowelt geringere Herstellkosten als in der Verbrennerwelt und noch geringere in der Wasserstoffwelt, bedingt durch die produzierten Stückzahlen. Jedoch steigen damit auch die Rohstoffkostenanteile an den gesamten Herstellkosten an. Im Jahr 2020 machen sie 3,2 % in der Verbrennerwelt; 3,6 % in der Elektrowelt und 3,9 % in der Wasserstoffwelt, analog dazu im Jahr 2030 6,1 %; 6,9 % und 7,4 % aus.

6.3 Ergebnisse bei durchschnittlicher Entwicklung der Rohstoffpreise

Im letzten Szenario der Rohstoffpreisentwicklung wird die durchschnittliche Entwicklung der Rohstoffpreise von 2000-2010 bis 2030 weitergeführt. In *Abbildung 6.7* wird das Ergebnis der Herstellkosten unter Berücksichtigung dieser Entwicklungen in den drei Welten gezeigt. Ähnlich der Darstellungsarten von zuvor repräsentieren die durchgezogenen Linien die Herstellkosten der Fahrzeuge bei unveränderten Rohstoffpreisen und die strichlierten Linien die Kosten des entsprechenden Fahrzeuges bei veränderten Rohstoffpreisen.

Zunächst ist auffallend, dass die Herstellkosten des CV ansteigen. Dies ist auf die steigenden Preise von Kupfer und der Platingruppenmetalle zurückzuführen. Der Anstieg fällt jedoch sehr gering aus, mit 3,2 % bis zum Jahr 2030 im Vergleich zum Jahr 2010. Wie auch schon bei den Szenarien zuvor, sind Kostenentwicklungen des CV in allen drei Welten gleich.

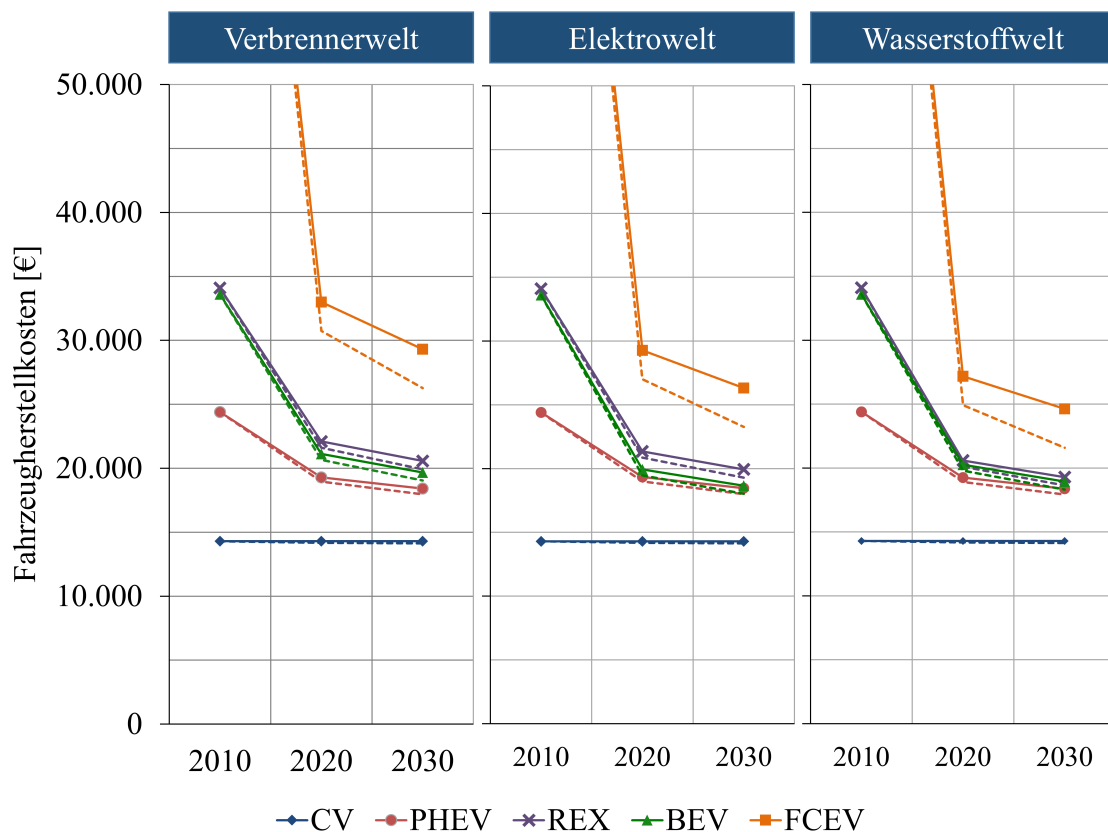


Abbildung 6.6: Entwicklung der Fahrzeugkosten in Szenario IX

Beim PHEV steigen die Herstellkosten im Jahr 2020 um knapp 0.3 Tsd. € und 2030 um 1.0 Tsd. € an, im Vergleich zu den Kosten bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen. In allen drei Welten würde das einem Anstieg um etwa 1,6 % bis 2020 und 5,3 % im Jahr 2030 entsprechen. Das PHEV profitiert davon, dass einige Rohstoffe in der langfristigen Perspektive (siehe *Kapitel 3*) fallende Preise aufweisen. Es kann daher die steigenden Preise der beiden oben erwähnten Rohstoffe etwas kompensieren.

Auch das REX, BEV und FCEV weisen in den drei Absatzwelten steigende Herstellkosten auf. Dabei ist der Anstieg im Jahr 2030 des REX und BEV, im Vergleich zu den Kosten bei gleich bleibenden Rohstoffpreisen, mit 6,2 % bzw. 6,1 % in der Verbrennerwelt; 6,4 % bzw. 6,5 % in der Elektrowelt und 6,7 % bzw. 6,4 % in der Wasserstoffwelt geringer ist, als das FCEV (24,7 %; 27,5 %; 29,4 %). Dies führt dazu, dass das REX seine niedrigsten Kosten in der Wasserstoffwelt mit 20.6 Tsd. € aufweist, dass BEV in der Elektrowelt mit 19.9 Tsd. € und das FCEV ebenfalls in der Wasserstoffwelt mit 31.9 Tsd. €. Im Bestfall sind die Kosten des REX dennoch um 39,4 %, das BEV um 34,6 % und das FCEV um 116,0 % höher als des CV.

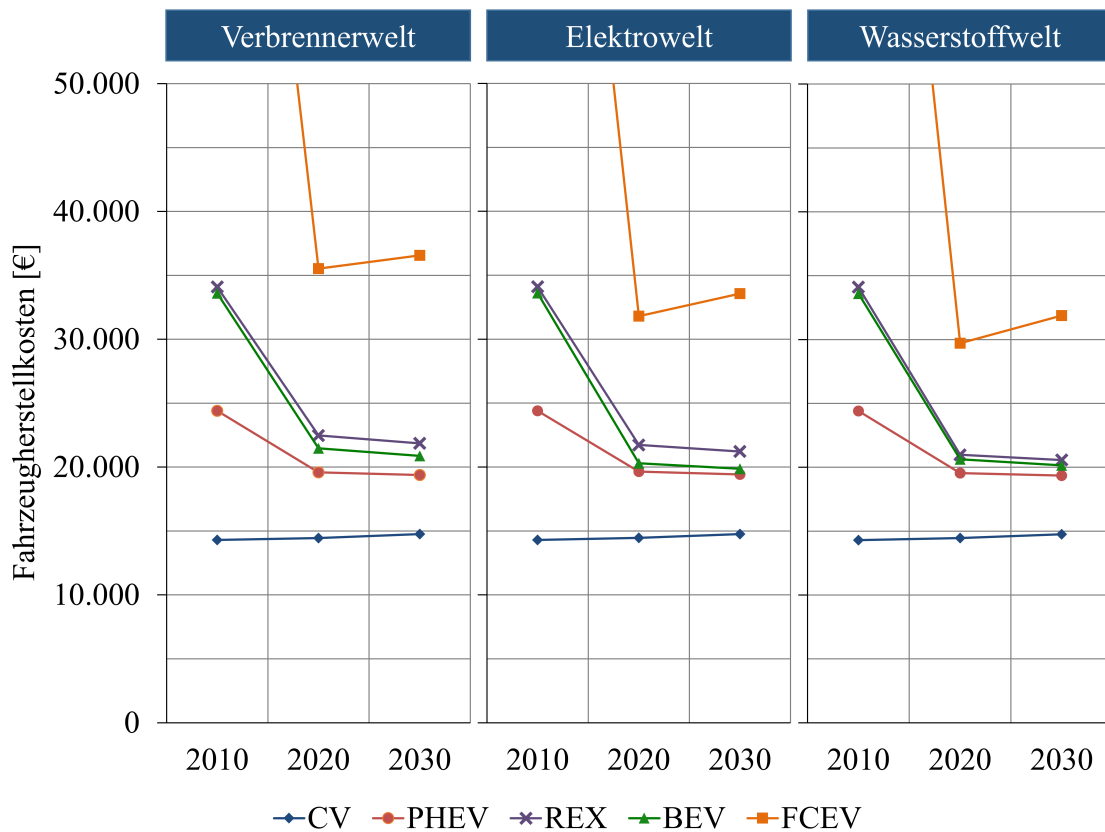


Abbildung 6.7: Entwicklung der Fahrzeugkosten in Szenario X

6.4 Untersuchung des Einflusses der Kundenwünsche im Angebotsmodell

In den vorhergehenden Abschnitten wurde besprochen, welche Auswirkungen auf die Herstellkosten bei unterschiedlichen Rohstoffpreisen und Absatzzahlen zu erwarten sind. Im Nachfragemodell (siehe *Kapitel 5*) wurden die Absatzzahlen unter Berücksichtigung von Herstellkosten, Reichweite und Ladedauer berechnet.

Eine Kombination der beiden Ansätze soll daher Schlüsse zulassen, welche Auswirkungen bei den Absatzzahlen zu erwarten sind, wenn die Anschaffungskosten „manipuliert“ werden. Dies kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen, indem Regierungen beispielsweise Antriebskonzepte subventionieren, Abwrackprämien einführen oder ganz einfach durch marketingtechnische Überlegungen von Fahrzeugherstellern. Für die weiteren Untersuchungen werden die Absatzzahlen, wie sie im Angebotsmodell gewählt worden sind, herangezogen und die Herstellkosten berechnet (siehe *Abschnitt 6.1*). Anschließend wird wie im Nachfragemodell der Absatz ermittelt, wobei die ermittelten Herstellkosten aus dem Angebotsmo-

dell übernommen werden.

Abbildung 6.8 zeigt ein vereinfachtes, theoretisches Ergebnis, das zur Erklärung der Überlegungen dient. Als Fläche dargestellt sind jene Absatzzahlen, die zur Berechnung der Herstellkosten herangezogen werden. Als Linie dargestellt sind jene Absatzzahlen, die sich, wie in Kapitel 5 vorgezeigt, unter Berücksichtigung der Kundenakzeptanz hinsichtlich Reichweite, Ladedauer und Anschaffungskosten berechnet.

Beim Turnaround kommt es zu jenem Punkt, bei dem es zu einer Überschneidung der Absatzzahlen des Nachfragemodells mit jenen des Angebotsmodell kommt. Das bedeutet, dass bis zum Zeitpunkt des Turnarounds durch die Fahrzeughersteller mehr Fahrzeuge produziert werden als sie absetzen können. Ab dem Zeitpunkt wird dann mehr abgesetzt, als angeboten.

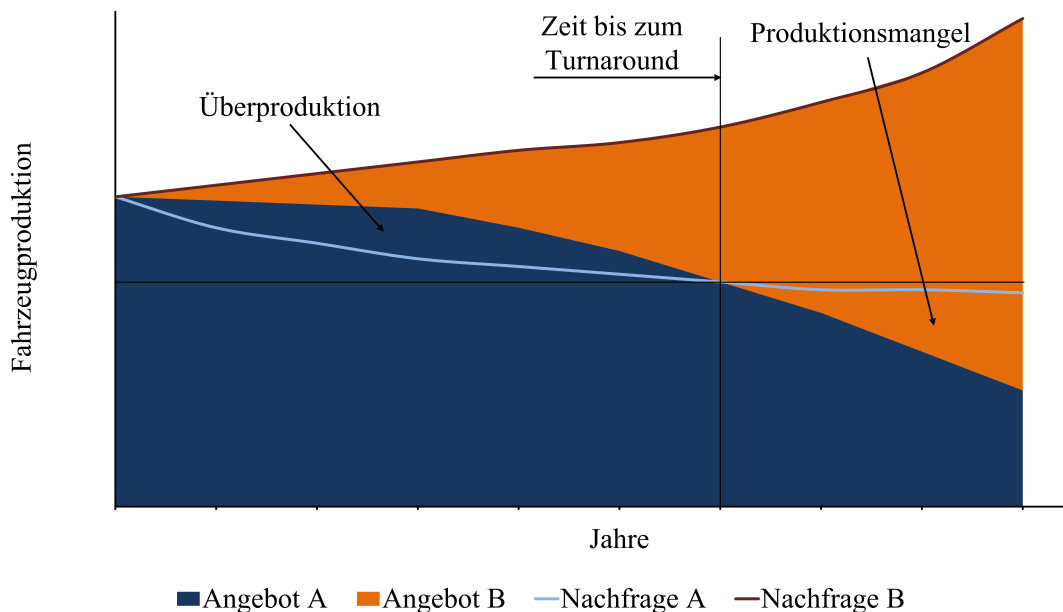


Abbildung 6.8: Verknüpfung von Angebots- und Nachfragemodell

Nun werden diese theoretischen Überlegungen auf die bereits durchgeführten Berechnungen übertragen. Aufgrund der Tatsache, dass es bei Veränderung der Rohstoffpreise zu einer zeitlichen Verschiebung eines Trends kommt (siehe Abschnitt 5.5), werden im Folgenden die Entwicklungen bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen betrachtet.

In Abbildung 6.9-6.11 sind die ermittelten Absatzzahlen in den drei Absatzszenarien – Verbrennerwelt, Elektrowelt und Wasserstoffwelt – bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen und unter Berücksichtigung der Kundenakzeptanz dargestellt. Beim CV

ist zu bemerken, dass in der Verbrennerwelt und in der Elektrowelt die Absatzzahlen (siehe *Abbildungen 6.1-6.2*) die für die Berechnung der Herstellkosten herangezogen werden, wesentlich höher sind, als der ermittelte Absatz über das Nachfragemodell. Lediglich zum Ende des Betrachtungszeitraums ist der Absatz von CV in der Wasserstoffwelt im Angebotsszenario höher. Zurückzuführen ist das auf die Tatsache, dass bei den anderen Konzepten die Kundenwünsche nicht ausreichend befriedigt werden, sodass die Kunden das Angebot nicht annehmen und daher weiterhin das CV nachfragen.

Beim PHEV ist zu erwarten, dass die prognostizierten Absatzzahlen aus dem Angebotsmodell in allen drei Welten übertroffen werden. Nachdem davon ausgegangen werden kann, dass die Fahrzeugindustrie versuchen wird die Nachfrage zu decken, werden sie die Produktionszahlen steigern. In einem weiteren Schritt führt das zu noch geringeren Herstellkosten.

Das Angebot an REX und BEV kann in der Verbrennerwelt die Nachfrage nicht decken. So könnten bei den Preisen (siehe *Abbildung 10.1*) mehr als das Dreifache an REX und das Doppelte an BEV abgesetzt werden. Der Absatz von REX ist auch in der Elektrowelt das Doppelte, als angeboten werden. Die Nachfrage nach dem BEV ist dafür geringer, sowohl in der Elektrowelt als auch in der Wasserstoffwelt, als im Angebotsszenario abgeschätzt wird.

Alle drei Szenarien des Angebotsmodells gehen davon aus, dass mehr FCEV am Markt angeboten werden, als unter den gegebenen Rahmenbedingungen hinsichtlich Kosten, Reichweite und Ladedauer tatsächlich auf dem Markt abgesetzt werden können. Nachdem die Ladedauer und Reichweite für das FCEV keine limitierenden Faktoren darstellen, sind die geringen Absatzzahlen ausschließlich auf die Kosten zurückzuführen.

Aus den Ergebnissen kann daher geschlossen werden, dass die angenommenen Absatzzahlen der Verbrennerwelt, die berechneten Absatzzahlen, unter Berücksichtigung der Kundenanforderungen, am besten trifft. Die anderen beiden Welten zeigen, dass alleine aufgrund der Subventionierung der Kosten nicht die gewünschten Absatzzahlen aus dem Angebotsszenario erreicht werden können, Ausnahme bildet das PHEV. Man kann daher davon ausgehen, dass die Absatzzahlen aus dem Angebotsszenario nur durch zusätzliche regulatorische Beschränkungen, wie zum Beispiel Verkaufs- und Fahrverbote, erreicht werden können.

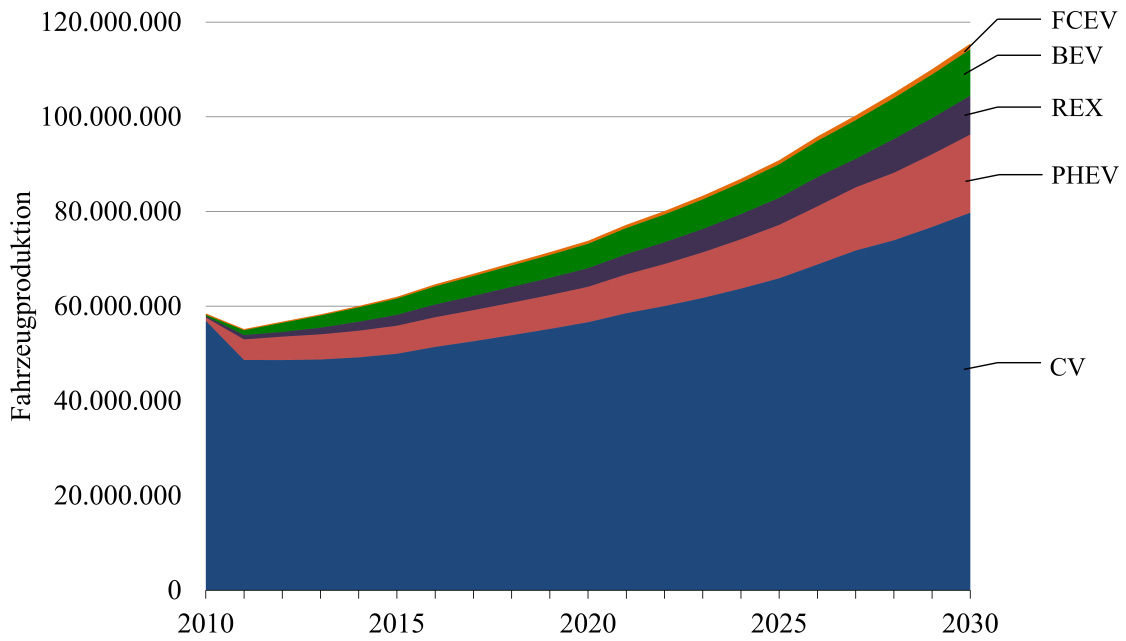


Abbildung 6.9: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfrageszenario bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen in der Verbrennerwelt

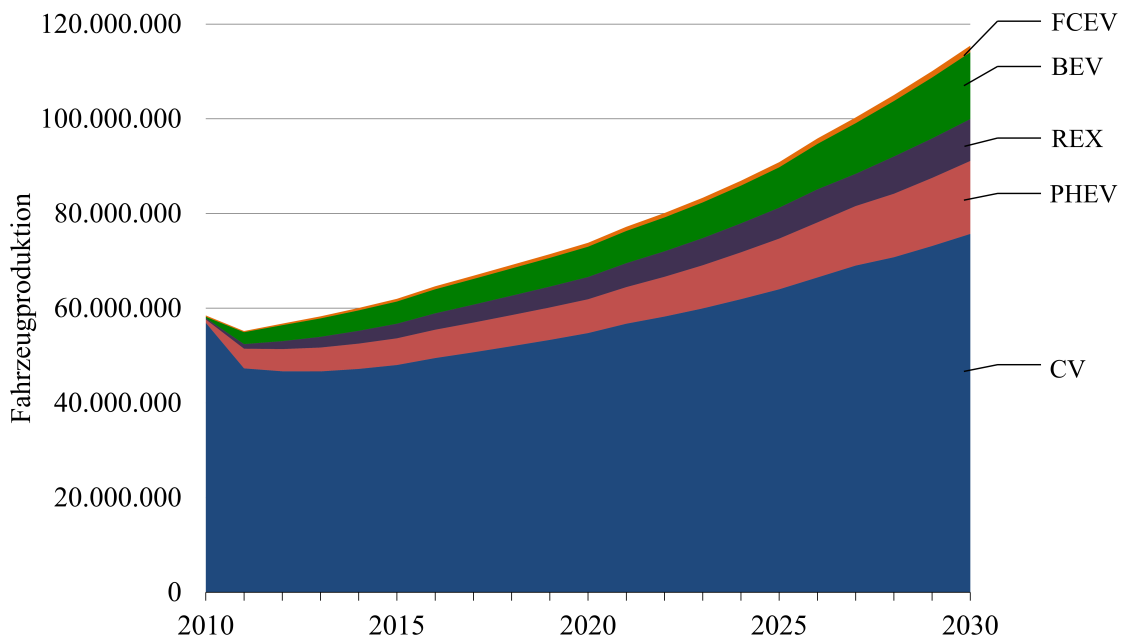


Abbildung 6.10: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfrageszenario bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen in der Elektrowelt

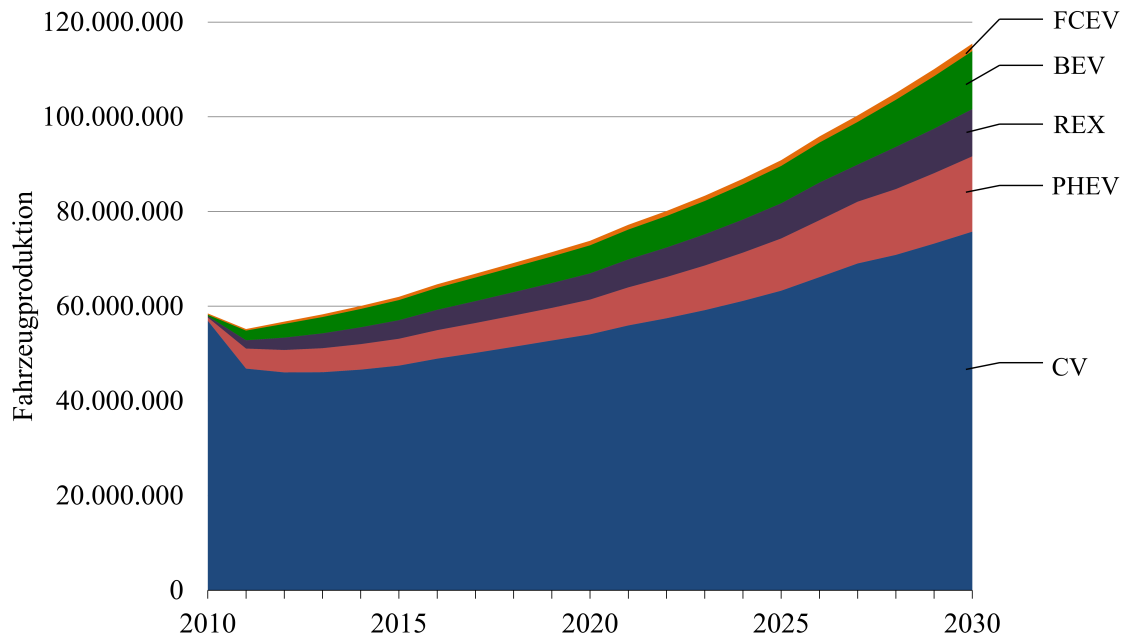


Abbildung 6.11: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfrageszenario bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen in der Wasserstoffwelt

6.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem Angebotsmodell

Bei konstanten Preisen der betrachteten Rohstoffe zeigt sich, dass die Herstellkosten des konventionellen Fahrzeuges in allen drei Welten keine Veränderung aufweisen, aber auch ein Anstieg und Sinken der Rohstoffpreise zeigt, dass die Herstellkosten des CV nur geringfügig betroffen sind. Dies liegt unter anderem daran, dass keine Veränderung bei der unveränderten Komponenten angenommen wird. Alle anderen Konzepte signalisieren, dass bei steigenden Preisen zunächst bis 2020 die Fahrzeugherstellkosten sinken und die Kosten im Jahr 2030 unter denen von 2010 liegen. Das REX und das BEV zeigen in allen drei Welten ähnliche Verläufe auf. Die Herstellkosten des REX sind, unabhängig von den Rohstoffpreisen geringfügig höher als die des BEV. Die Kosten für das FCEV werden immer weit über den Kosten des CV liegen, weshalb dem FCEV nur geringe Chancen auf dem Markt eingeräumt werden können..

Aus den Ergebnissen kann daher geschlossen werden, dass die angenommenen Absatzzahlen der Verbrennerwelt, die berechneten Absatzzahlen, unter Berücksichtigung der Kundenanforderungen, am besten trifft. Die anderen beiden Welten zeigen,

dass alleine aufgrund der Subventionierung der Kosten nicht die gewünschten Zahlen aus dem Angebotsszenario erreicht werden können, Ausnahme bildet das PHEV. Man kann daher davon ausgehen, dass die Absatzzahlen aus dem Angebotsszenario nur durch zusätzliche regulatorische Beschränkungen, wie zum Beispiel Verkaufs- und Fahrverbote, erreicht werden können.

Kapitel 7

Rohstoffmodell – Ermittlung des Einflusses auf und durch Rohstoffe

Die Beurteilung der Kritikalität von Rohstoffen¹ bzw. deren veränderte Kritikalität aufgrund der geänderten Nachfrage durch die Fahrzeugindustrie wird in diesem Kapitel geklärt. Als Grundlage dienen die Rohstoffmengen pro Fahrzeugkonzept, welche in *Tabelle 3.1* angeführt sind. Parallel dazu werden die in *Kapitel 4.4* gewonnenen Resultate herangezogen, um die benötigten Mengen, aufgeschlüsselt nach Rohstoff und Jahr, zu berechnen.

Die benötigten Mengen pro Jahr ergeben sich aus dem Produkt der Rohstoffmenge pro Fahrzeug und der produzierten Fahrzeuge pro Jahr. Die *Tabellen 7.1-7.3* zeigen die Ergebnisse der Berechnungen, abhängig von der Absatzverteilung, wobei hier die kumulierten Summen der Mengen aller zu vorhergehenden Jahren ab 2010 angeführt werden. Für die weiteren Untersuchungen werden nur mehr die Absatzzahlen des Angebotsmodells herangezogen, da die Ergebnisse aus dem Nachfragemodell (siehe *Kapitel 5*) zeigen, dass die prognostizierten Stückzahlen der Verbrennerwelt im Angebotsszenario ähnlich sind

Dem Einfluss möglicher staatlicher Zielvorgaben (z. B. DER ÖSTERREICHISCHE ROHSTOFFPLAN [81]) wird nicht dezidiert betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Auswirkungen im Rohstoffpreis widerspiegeln und daher mit den Rohstoffpreisszenarien hinreichend berücksichtigt werden (siehe *Abschnitt 4.3*).

In allen drei Szenarien ist Kupfer der Rohstoff, von dem mengenmäßig auch im zeitlichen Verlauf gesehen am meisten benötigt wird. Relativ zu den anderen (siehe

¹Als kritischer Rohstoff werden in dieser Arbeit all jene bezeichnet, bei denen entweder das „Versorgungsrisiko“, die „Vulnerabilität“ oder beides als hoch eingeschätzt wird.

Tabellen 7.1-7.3) weist es aber ein geringeres Wachstum auf. Lediglich die Platingruppenmetalle (PGM) zeigen ein ähnlich geringes Wachstum auf. Das ist darauf zurückzuführen, dass sie zwar in den neuen Antriebskonzepten, insbesondere bei der Brennstoffzelle, eingesetzt werden, jedoch wird die Nachfrage durch den Rückgang bei den CV, welches es hauptsächlich im Abgasstrang benötigt, kompensiert. Die Nachfrage von PGM ist im Szenario der Wasserstoffwelt daher am größten.

Lithium ist ein Metall, das vorwiegend in der Traktionsbatterie zum Einsatz kommt, welche in allen Antriebskonzepten, außer dem CV, verbaut ist. Es steigt daher der Bedarf, je mehr Fahrzeuge mit alternativem Antrieb gebaut werden. Es ist daher der Bedarf um etwa 15,7 % im Jahr 2030 in der Wasserstoffwelt größer als in der Elektrowelt.

Die Rohstoffe Indium, Gallium, Germanium, Kobalt und SEE weisen in den jeweiligen Szenarien ähnliche Wachstumsraten auf. Dies liegt daran, dass sie ausschließlich in den neuen Antriebskonzepten benötigt werden. So ist der Bedarf im Jahr 2030 zum Beispiel bei diesen fünf Rohstoffen in der Elektrowelt um etwa 73 % größer als in der Verbrennerwelt. Weitere 48 % sind in der Wasserstoffwelt notwendig im Vergleich zur Elektrowelt.

Zusammenfassend kann aber gesagt werden, dass alle Rohstoffe vermehrt nachgefragt werden. Die „Elektromobilität“ lässt die Nachfrage von Rohstoffen zwar steigen, jedoch würde die Nachfrage auch ohne sie steigen, bedingt durch die Tatsache, dass der gesamte Fahrzeugbestand bis 2030 steigt.

Tabelle 7.1: Rohstoffverbrauch bis 2030 – Szenario 1: Verbrennerwelt

| | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | [metr. t] | | | | |
| Kupfer | 844.000 | 2.013.000 | 2.729.000 | 3.749.000 | 5.274.000 |
| Lithium | 3 | 8.700 | 21.900 | 40.900 | 69.600 |
| Graphit | 30 | 98.700 | 247.600 | 462.500 | 789.000 |
| Indium | 0 | 60 | 145 | 270 | 460 |
| Gallium | 0 | 6 | 15 | 30 | 50 |
| Germanium | 0 | 8 | 20 | 40 | 65 |
| Kobalt | 1 | 4.100 | 10.200 | 19.000 | 32.500 |
| SEE | 3 | 10.000 | 25.000 | 46.800 | 79.800 |
| PGM | 150 | 330 | 433 | 600 | 800 |

Tabelle 7.2: Rohstoffverbrauch bis 2030 – Szenario 2: Elektrowelt

| | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | [metr. t] | | | | |
| Kupfer | 844.000 | 2.658.000 | 4.349.000 | 6.774.000 | 10.434.000 |
| Lithium | 3 | 31.600 | 79.200 | 148.000 | 252.500 |
| Graphit | 30 | 358.300 | 899.300 | 1.679.800 | 2.865.400 |
| Indium | 0 | 210 | 530 | 1000 | 1.700 |
| Gallium | 0 | 20 | 50 | 100 | 170 |
| Germanium | 0 | 30 | 75 | 140 | 235 |
| Kobalt | 1 | 14.900 | 37.300 | 69.700 | 118.800 |
| SEE | 3 | 36.500 | 91.600 | 171.100 | 292.000 |
| PGM | 150 | 460 | 750 | 1.200 | 1.800 |

Tabelle 7.3: Rohstoffverbrauch bis 2030 – Szenario 3: Wasserstoffwelt

| | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | [metr. t] | | | | |
| Kupfer | 844.000 | 3.020.200 | 5.256.800 | 8.470.100 | 13.327.600 |
| Lithium | 3 | 37.500 | 94.000 | 175.700 | 299.700 |
| Graphit | 30 | 429.200 | 1.077.300 | 2.012.400 | 3.432.800 |
| Indium | 0 | 315 | 790 | 1.500 | 2.500 |
| Gallium | 0 | 30 | 80 | 150 | 250 |
| Germanium | 0 | 45 | 110 | 205 | 350 |
| Kobalt | 1 | 22.000 | 55.300 | 103.400 | 176.300 |
| SEE | 3 | 54.200 | 135.900 | 253.900 | 433.100 |
| PGM | 150 | 8000 | 1.600 | 2.800 | 4.600 |

Die Ergebnisse zeigen, welche Mengenauswirkungen die verschiedenen Szenarien auf die Nachfrage der einzelnen Rohstoffe haben. Jedoch kann noch nicht beantwortet werden, ob sich die Kritikalität der Rohstoffe dadurch verändert. Dazu müssen mehrere Faktoren betrachtet werden, da wie schon in *Kapitel 3* besprochen, die Rohstoffkritikalität durch viele Faktoren beeinflusst wird. In der Studie KRITISCHE ROHSTOFFE FÜR DEUTSCHLAND [82] wurde eine Methodik erarbeitet, die die Kritikalität der Rohstoffe beurteilt. Das Grundkonzept dieser Studie bietet die Basis für die nachstehenden Analysen. Die Möglichkeit des Umlegens der Methode ist nicht vollständig gegeben, nachdem in dieser Arbeit eine Industriesparte untersucht wird und andere Faktoren relevant sind. Dies verlangt eine Anpassung der Berechnung der Indikatoren.

Die Studie benutzt ein Matrix-Konzept und unterscheidet zwischen zwei Indikatoren, dem Versorgungsrisiko und der Vulnerabilität, welche wiederum verschiedene

Faktoren umfassen. Das Konzept bietet den Vorteil, dass die Kritikalität nur gegeben ist, wenn beide Indikatoren als hoch eingestuft worden sind. Außerdem kann eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Studie CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU [3] ermöglicht werden. Sie wurde schon in *Abschnitt 2.2* zur Bestimmung jener Rohstoffe, die in dieser Studie betrachtet werden sollen, herangezogen. Das Rohstoffmodell bezieht sich auf das Jahr 2010².

Die Indikatoren und deren bestimmende Faktoren werden im Folgenden besprochen, wobei sie dabei drei Grundregeln folgen:

1. Jedem Rohstoff wird pro Faktor ein Wert zugeordnet. Der Wert liegt immer zwischen 0 und 1, wobei der Beitrag zur Kritikalität steigt, je näher der Wert bei 1 liegt.
2. Die Faktoren werden je Indikator unterschiedlich gewichtet, wie in [83], [84] vorgezeigt, und erst die Summe stellt den Wert des Indikators dar. Es können daher sowohl die Vulnerabilität als auch das Versorgungsrisiko einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen.
3. Die Position des Rohstoffs in der Matrix ist durch die beiden Indikatoren bestimmt, wobei das Versorgungsrisiko auf der Abszissenachse und die Vulnerabilität auf der Ordinatenachse aufgetragen wird.
4. Sind keine Angaben in der Literatur zu den Werten, zum Beispiel zu den Reserven oder Ressourcen vorhanden, dann wird das Risiko mit 1 angenommen. Bei Werten, wo die Einschätzung durch Experten notwendig ist, wird auf Angaben der Literatur zurück gegriffen.

7.1 Versorgungsrisiko

Das Versorgungsrisiko analysiert und bewertet mögliche Gefahren, die direkt vom Rohstoff ausgehen. Dabei wird zwischen drei Risiken unterschieden: Länder-, Markt- und Strukturrisiko.

Beim Länderrisiko stehen jene Länder, die den jeweiligen Rohstoff abbauen, im Mittelpunkt. Dazu muss parallel zur Konzentration die politische und wirtschaftliche Situationen der verschiedenen Ländern mitberücksichtigt werden, sowohl hinsichtlich der Produktion, als auch bei den Reserven.

²Das Jahr 2010 ist zwar noch von der weltweiten Wirtschaftskrise beeinflusst, jedoch haben sich die Rohstoffe weitgehend erholt.

Das Marktrisiko repräsentiert jene Gefahren, die durch eine mögliche eingeschränkte oder unökonomische Ausnutzung der Vorräte entsteht.

Abgeschlossen wird der Indikator Versorgungsrisiko durch das Strukturrisiko, durch eine Analyse der physikalisch-technischen Restriktionen. Zunächst wird überprüft, ob die weltweite Produktion des Rohstoffes im Mittelmaß ein Haupt- oder Nebenprodukt beim Abbau eines anderen Rohstoffes ist. Anschließend fließt hier auch eine mögliche Recyclingfähigkeit ein.

7.1.1 Länderrisiko

Marktanteile einzelner Länder von zum Beispiel über 90 % (siehe *Abschnitt 3.4.8*) der weltweiten Produktion bei Seltenen Erden in China oder von rund 60 % (siehe *Abschnitt 3.4.3*) der Lithiumreserven in Chile, lassen vermuten, dass der Einfluss einzelner weniger Länder auf die Rohstoffversorgung wesentlich ist. Die Analysen in *Kapitel 3* lassen im Allgemeinen erkennen, dass die größten Abbauländer nicht automatisch auch jene mit den größten Reserven sind.

Konzentration der Produktion im Jahr 2010 Um den Einfluss der einzelnen Abbauländer beurteilen zu können, wird mittels Herfindahl-Hirschmann-Index (siehe *Abschnitt 3.3*) die Konzentration der Länder berechnet. Zusätzlich folgt eine Analyse möglicher Risiken, die durch die Abbauländer entstehen. Dazu wird der WORLDWIDE GOVERNANCE INDICATOR (WGI), der jährlich von der Weltbank erstellt wird, herangezogen. Er beschreibt mittels sechs Bewertungskriterien

- politische Stabilität,
- Leistungsfähigkeit der Regierung,
- Mitspracherecht und Verantwortlichkeit,
- staatliche Ordnungspolitik,
- Rechtsstaatlichkeit und
- Korruptionskontrolle die Länder die politischen und gesellschaftlichen Strukturen eines Landes.

Um nun die Konzentration der Produktion unter Berücksichtigung der Länderrisiken zu errechnen, wird die Summe aus dem jeweiligen HHI mit dem dazugehörigen WGI

multipliziert. Der dazu notwendige WGI der Weltbank (Werte von -2,5 bis +2,5) wurde zuvor skaliert, sodass ein WGI von -2,5 dem Wert 1 – schlechte Governance – und ein WGI von +2,5 dem Wert 0 – gute Governance – entspricht. Eine Konzentration der Produktion von 1 bedeutet eine maximale Konzentration mit einer schlechten Governance, folglich ein maximales Risiko, wobei 0 weder eine hohe Konzentration, noch eine schlechte Governance bedeutet und daher kein Risiko besteht.

Konzentration der Reserven im Jahr 2010 Die Vorgangsweise bei der Berechnung ist dieselbe, wie die bei der Konzentration der Produktion, jedoch werden nun statt der Produktion die Reserven eingesetzt. Die Konzentration der Reserven soll Aufschluss über langfristige Entwicklungen geben.

Auch hier bedeutet eine Konzentration der Reserven von 1, eine maximale Konzentration mit einer schlechten Governance (maximales Risiko) und 0 keine Konzentration und eine schlechte Governance (kein Risiko). Sollten keine Werte für die Reserven bekannt sein, wird ein maximales Risiko angenommen.

7.1.2 Marktrisiko

Unter einem Marktrisiko werden jene Risiken verstanden, die sich durch das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage ergeben. Es wird hier nochmals unterschieden zwischen der statischen Reichweite und der Ressourcenreichweite.

Statische Reichweite Die statische Reichweite wird wie in *Abschnitt 3.3* berechnet. Das Verhältnis soll Aufschluss über die mittelfristige Verfügbarkeit der Rohstoffe geben. Um auch die langfristige Entwicklung in die Betrachtungen aufzunehmen, wird die statische Reichweite nicht nur für 2010 berücksichtigt, sondern auch für 2030. Für die Berechnung werden die Rohstoffmengen aus den drei Szenarien (siehe *Tabelle 7.1-7.3*) bis 2030 herangezogen.

In *Tabelle 7.4* sind die Beurteilungskriterien für die statische Reichweite dargestellt. Je geringer sie ist, desto größer ist das Risiko. Bei einer Reichweite unter 20 Jahren wird das Risiko mit 1 bewertet und bei jener über 100 Jahre, wird kein Risiko erwartet.

Tabelle 7.4: Beurteilungskriterien – Statische Reichweite [53], [82]

| | |
|-----|--|
| 1 | Statische Reichweite \leq 20 Jahre |
| 0,7 | 20 Jahre < Statische Reichweite \leq 50 Jahre |
| 0,3 | 50 Jahre < Statische Reichweite \leq 100 Jahre |
| 0 | 100 Jahre < Statische Reichweite |

Ressourcenreichweite Aufgrund der Problematik bei der Abgrenzung von Reserven und Ressourcen (siehe *Abschnitt 3.3*) wird als weiterer Faktor die Ressourcenreichweite berücksichtigt. In *Tabelle 7.5* werden die Beurteilungskriterien der Ressourcenreichweite angeführt, wobei auch hier eine Reichweite von mehr als 100 Jahren dem Wert 0 (minimales Risiko) entspricht und ein Reichweite von unter 20 Jahren einem Wert von 1 (maximales Risiko). In Anlehnung an die Vorgangsweise bei der statischen Reichweite wird auch die Ressourcenreichweite für das Jahr 2010 und 2030 berechnet.

Tabelle 7.5: Beurteilungskriterien – Ressourcenreichweite [53], [82]

| | |
|-----|--|
| 1 | Ressourcenreichweite \leq 20 Jahre |
| 0,7 | 20 Jahre < Ressourcenreichweite \leq 50 Jahre |
| 0,3 | 50 Jahre < Ressourcenreichweite \leq 100 Jahre |
| 0 | 100 Jahre < Ressourcenreichweite |

7.1.3 Strukturrisiko

Das letzte der drei Versorgungsrisiken ist das Strukturrisiko, welches die Risiken ausgehend von den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Rohstoffes beschreibt.

Anteil an der globalen Primär- und Co-Produktion Die Problematik der Abhängigkeit einzelner Rohstoffe von einem anderen Rohstoff wurde am Beginn von *Kapitel 3* besprochen. Bei der Risikoabschätzung wird es als Teil des Strukturrisikos berücksichtigt, wobei das Risiko höher bewertet wird, je wahrscheinlicher der Rohstoff als Nebenprodukt anfällt (siehe *Tabelle 7.6*).

Tabelle 7.6: Beurteilungskriterien – Primärproduktion versus Co-Produktion [53], [82]

| | |
|-----|---------------------------------|
| 1 | Ausschließlich Co-Produktion |
| 0,7 | Überwiegend Co-Produktion |
| 0,3 | Überwiegend Primärproduktion |
| 0 | Ausschließlich Primärproduktion |

Recyclingfähigkeit Der zweite bestimmende Faktor des Strukturrisikos ist die Recyclingfähigkeit des Rohstoffes. In [85] wird abgeschätzt, dass in Deponien gelagerter Hausmüll etwa 124 % des Eisens und 142 % des deutschen Jahresbedarfs an Kupfer decken kann. Auch bei der Energiebilanz wird davon ausgegangen, dass eine Aufbereitung positiv ausfällt. Insbesondere aber auch im Hinblick auf steigende Rohstoffpreise und parallel dazu steigender Schrottpreisen muss dem Recycling Aufmerksamkeit geschenkt werden [86].

In *Tabelle 7.7* sind die Beurteilungskriterien angeführt. Das Risiko steigt, je mehr davon ausgegangen werden kann, dass aus physikalisch-chemischer Sicht der Rohstoff recycelt werden kann. Ökonomische Aspekte werden dabei nicht berücksichtigt, da diese direkt vom Rohstoffpreis abhängen. Das Risiko wird mit 0 eingeschätzt, sollte der Rohstoff vollkommen recycelbar sein.

Bei der Definition des Betrachtungsumfanges in *Abschnitt 1.1* wird festgestellt, dass Recycling nicht berücksichtigt wird. Es wird deswegen hier lediglich die Recyclingfähigkeit beurteilt, aber nicht die tatsächlichen Recyclingraten der einzelnen Rohstoffe. In den *Tabellen 10.3-10.11* werden die Recyclingraten angegeben, welche aber nur einen Überblick geben können, da sie regional unterschiedlich sind.

Tabelle 7.7: Beurteilungskriterien – Recyclingfähigkeit [53], [82]

| | |
|-----|--|
| 1 | physikalisch-chemisch nahezu unmögliches Recycling |
| 0,7 | Recycling mit hohem Kostenaufwand und/oder Qualitätsverlust möglich |
| 0,3 | Recycling mit geringem Kostenaufwand und/oder Qualitätsverlust möglich |
| 0 | Recycling möglich |

7.1.4 Gewichtung des Versorgungsrisikos

Wie zu Beginn des Kapitels beschrieben, ergibt die Summe des Indikators den Wert des Faktors. Jedem Faktor wird dazu eine Gewichtung zugewiesen, die in *Tabelle 7.8* angeführt ist. Die Gewichtung orientiert sich an den Werten in [82]. Jenen mit einer höheren Genauigkeit, wie die Produktion oder die statische Reichweite, wird eine höhere Gewichtung zugewiesen. Der Einfluss der Gewichtung wird in *Abschnitt 8.4* untersucht.

Tabelle 7.8: Zusammenfassung des Versorgungsrisikos

| | Gewichtung |
|--|------------|
| Länderrisiko | |
| Globale Produktion | 20 % |
| Globale Reserven | 10 % |
| Statische Reichweite | |
| 2010 | 20 % |
| 2030 | 10 % |
| Ressourcenreichweite | |
| 2010 | 15 % |
| 2030 | 5 % |
| Anteil an der globalen Haupt-und Nebenproduktion | 10 % |
| Recyclingfähigkeit | 10 % |

7.2 Vulnerabilität

Bei der Vulnerabilität, der Verwundbarkeit der Fahrzeugindustrie, wird zwischen der Mengendimension – Anteil am Weltverbrauch – und der strategischen Dimension – globaler Nachfrageimpuls und Substituierbarkeit – unterschieden. Ersteres untersucht die Auswirkungen die Fahrzeugindustrie bzw. der notwendigen Rohstoffe auf die Rohstoffproduktion. Bei der strategischen Dimension werden die Rohstoffe, unabhängig von der Nachfrage einer einzigen Industriesparte und der Substituierbarkeit durch einen anderen, bewertet.

7.2.1 Anteil am Weltverbrauch

Um die Bedeutung der Nachfrage an einem Rohstoff durch die Fahrzeugindustrie abzubilden, wird der Faktor des Anteils am Weltverbrauch eingeführt. Er berechnet sich aus der Nachfrage nach einem Rohstoff durch der Fahrzeugindustrie an der Gesamtproduktion eines Rohstoffes. Als Rohstoffnachfrage werden die ermittelten Verbräuche von zuvor (siehe *Tabelle 7.1-7.3*) herangezogen. Nachdem die Nachfrage schon auf einer höheren Wertschöpfungsstufe stattfindet, wird sie unter Beachtung von Aufbereitungsverlusten und globalen Recyclingraten abgeschätzt.

Um auch der zeitlichen Dimension Beachtung zu schenken, werden die Anteile für die Jahre 2010, 2020 und 2030 berechnet, wobei als Basis für die Produktion das Jahr 2010 herangezogen wird. Dies dient als Anzeichen für eine sich entwickelnden Tendenz in den verschiedenen Fahrzeugwelten. Je geringer der Anteil der Nachfrage

ist, desto geringer wird auch der Wert des Faktors sein.

Tabelle 7.9: Beurteilungskriterien – Anteil am Weltproduktion [82]

| | |
|-----|--|
| 1 | $10\% \leq$ Anteil an der Weltproduktion |
| 0,7 | $10\% >$ Anteil an der Weltproduktion $\geq 5\%$ |
| 0,3 | $5\% >$ Anteil an der Weltproduktion $\geq 1\%$ |
| 0 | $1\% >$ Anteil an der Weltproduktion |

7.2.2 Globaler Nachfrageimpuls

Neben der Fahrzeugindustrie und deren technologischen und wirtschaftlichen Entwicklungen kann man davon ausgehen, dass auch andere Industrien die Rohstoffe nachfragen werden. Dies soll durch den Faktor des globalen Nachfrageimpulses bewertet werden. Die Werte für den Faktor werden aus der Studie [53] übernommen. Wie *Tabelle 7.10* zu entnehmen ist, stellt ein Wert von 1 einen hohen globalen Nachfrageimpuls bis 2030 dar und ein Wert von 0 einen unkritischen Impuls.

Tabelle 7.10: Beurteilungskriterien – Nachfrageimpuls [82]

| | |
|-----|---|
| 1 | Sehr sensitiv: Globaler Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030) von $\geq 200\%$ der globalen Rohstoffproduktion (2010) |
| 0,7 | Sensitiv: Globaler Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030) zwischen $< 200\%$ und $\geq 100\%$ der globalen Rohstoffproduktion (2010) |
| 0,3 | Intensiv: Globaler Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030) zwischen $< 100\%$ und $\geq 50\%$ der globalen Rohstoffproduktion (2010) |
| 0 | Unkritisch: Globaler Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030) von $< 50\%$ der globalen Rohstoffproduktion (2010) |

7.2.3 Substituierbarkeit

Bei der Substituierbarkeit unterscheidet man zwischen drei unterschiedlichen Ebenen. Die erste Ebene ist die Substitution eines Rohstoffs durch einen anderen. Als Beispiel sollen hier Kupfer und Aluminium genannt werden, die aufgrund ihrer Leitfähigkeit sehr ähnlich sind. Als weitere Ebene gilt die Substitution auf Komponentenebene, bei der eine ganze Komponente durch eine andere, die den Rohstoff in einer anderen Menge benötigt, ersetzt wird. Die letzte Ebene ist die Funktionsebene. Für unsere Betrachtungen wird die Substitution eines Rohstoffes berücksichtigt. Die Klassifizierung des Faktors kann die Werte aus *Tabelle 7.11* annehmen.

Tabelle 7.11: Beurteilungskriterien – Substituierbarkeit [53], [82]

| | |
|-----|---|
| 1 | Keine Substituierbarkeit |
| 0,7 | Substituierbarkeit mit hohen Kosten/ hohem Funktionsverlust |
| 0,3 | Substituierbarkeit mit geringen Kosten |
| 0 | Leicht und vollständig substituierbar |

7.2.4 Gewichtung der Vulnerabilität

Zur Berechnung des Indikators müssen die einzelnen Faktoren mittels einer Gewichtung zu einem Gesamtwert summiert werden, wie in *Tabelle 7.12* angeführt. Als Grundlage für die Gewichtung dient jene aus Studie [82], in der jeweils 50 % den beiden Dimensionen – Mengendimension und strategische Dimension – zugeteilt wird. Des Weiteren wird dem aktuellen Anteil eine höhere Gewichtung zugeordnet, als den zukünftigen Anteilen und der Substituierbarkeit.

Tabelle 7.12: Zusammenfassung der Vulnerabilität

| | Gewichtung |
|---|------------|
| Anteil an der Weltproduktion im Jahr 2010 | 20 % |
| Anteil an der Weltproduktion im Jahr 2020 | 15 % |
| Anteil an der Weltproduktion im Jahr 2030 | 15 % |
| Globaler Nachfrageimpuls | 30 % |
| Substituierbarkeit | 20 % |

7.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus dem Rohstoffmodell

Die Anwendung der oben vorgestellten Methode zur Ermittlung der Kritikalität der Rohstoffe in Abhängigkeit zum Verbrauch in den in *Kapitel 6* vorgestellten Absatzszenarien, wird in den nachstehenden Abbildungen dargestellt. Die Rohstoffnachfrage durch die Automobilindustrie wird in den *Tabellen 7.1-7.3* angeführt. Bei den Punkten Anteil an der globalen Primär- und Co-Produktion, Recyclingfähigkeit, Globaler Nachfrageimpuls und Substituierbarkeit wurden die Werte aus [82], [53] und [3] herangezogen.

Szenario 1: Verbrennerwelt Das Ergebnis der Kritikalitätsuntersuchung in der Verbrennerwelt wird in *Abbildung 7.1* wiedergegeben. Im Wesentlichen sind vier

Gruppen zu erkennen.

- Die erste Gruppe stellt Graphit und Kupfer dar, welche eine geringe Kritikalität bei beiden Indikatoren aufweisen. Beide besitzen im Vergleich zu den anderen Rohstoffen ein geringes Länderrisiko und kein Risiko bei der Ressourcenreichweite. Schon in den *Abschnitten 3.4.2* und *3.4.4* wurde die zurückgehende Marktkonzentration besprochen. Im Vergleich zu Graphit besitzt Kupfer ein höheres Risiko bei der statischen Reichweite und ein geringfügig höheres Risiko beim Anteil an der globalen Haupt- und Co-Produktion. Dafür wird die Recyclingfähigkeit von Kupfer sehr gut eingeschätzt. Aufgrund der guten Substituierbarkeit wird den beiden nur eine geringe Vulnerabilität zugeordnet.
- Die nächste Gruppe bilden Lithium und Kobalt, die im Vergleich zur ersten Gruppe eine geringfügig höhere Kritikalität hinsichtlich der Vulnerabilität aufweisen, die auf die schlechtere Substituierbarkeit zurückzuführen ist. Beim Versorgungsrisiko sind sie ähnlich. Lithium weist ein sehr geringes Versorgungsrisiko auf, nachdem nur ein geringes Länderrisiko und Marktrisiko zu erwarten sind. Die Recyclingfähigkeit ist dafür sehr gering und mit hohen Kosten verbunden. Kobalt weist, im Vergleich zu Kupfer, Graphit und Lithium einen schlechten Wert beim Anteil an der Primär- und Co-Produktion auf. Schon *Abbildung 3.1* zeigt, dass es ausschließlich als Co-Produkt mit keiner eigenen Produktion hergestellt wird.
- Platingruppenmetalle und Seltene Erden bilden die dritte Gruppe, deren Versorgungsrisiko noch gering beurteilt wird, allerdings weisen sie eine sehr hohe Vulnerabilität auf. Besonders ist aber zu bemerken, dass im Vergleich zu allen anderen Rohstoffen SEE das höchste Risiko bei der Konzentration der Produktionsländer aufweist, jedoch die Konzentration der Reserven auf einem sehr niedrigem Niveau ist. Die Beurteilung der Ressourcenreichweite von SEE ist ebenfalls kritisch, jedoch kann das auf eine schlechte Datenqualität zurückgeführt werden. Beide Rohstoffe werden bei der statischen Reichweite als unkritisch beurteilt. Die hohe Vulnerabilität ist durch einen hohen Anteil der Fahrzeugindustrie an der Weltproduktion, den sensitiven globalen Nachfrageimpuls und die fehlende Substituierbarkeit begründet.
- Die letzte Gruppe, bei denen sowohl das Versorgungsrisiko als auch die Vulnerabilität kritisch beurteilt werden, bilden Gallium, Indium und Germanium. Hinsichtlich des Versorgungsrisikos wird das Länderrisiko der Produktion bei

den drei Rohstoffen im Vergleich zur vorhergehenden Gruppe geringer eingeschätzt, jedoch das der globalen Reserven höher. Markt- und Strukturrisiko werden ebenfalls sehr kritisch bewertet. Die Vulnerabilität ist geringer, was an einer leicht besseren Substituierbarkeit liegt.

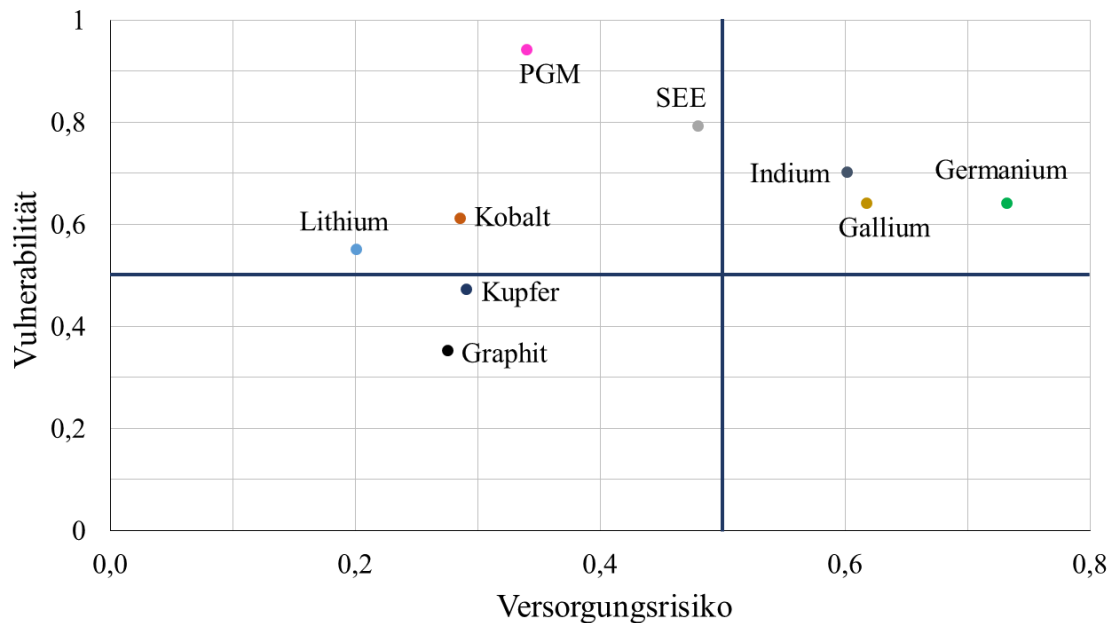


Abbildung 7.1: Rohstoffmodell – Szenario 1: Verbrennerwelt

Szenario 2: Elektrowelt Die Kritikalitätsanalyse bei Fahrzeugabsatzzahlen wie in der Elektrowelt - Fokus auf REX und BEV - wird in *Abbildung 7.2* wiedergegeben. Aufgrund des bereits hohen Anteils am Weltverbrauch in der Verbrennerwelt sind keine Veränderungen bei der Vulnerabilität zu erkennen. Im Allgemeinen kann der Schluss gezogen werden, dass die Gruppen ähnlich wie in der Verbrennerwelt sind. Indes kommt es durch eine steigende Nachfrage zu einer Veränderung der Kritikalität des Versorgungsrisikos. Insbesondere sind Kobalt, Platingruppenmetalle, Seltene Erden und Indium davon betroffen.

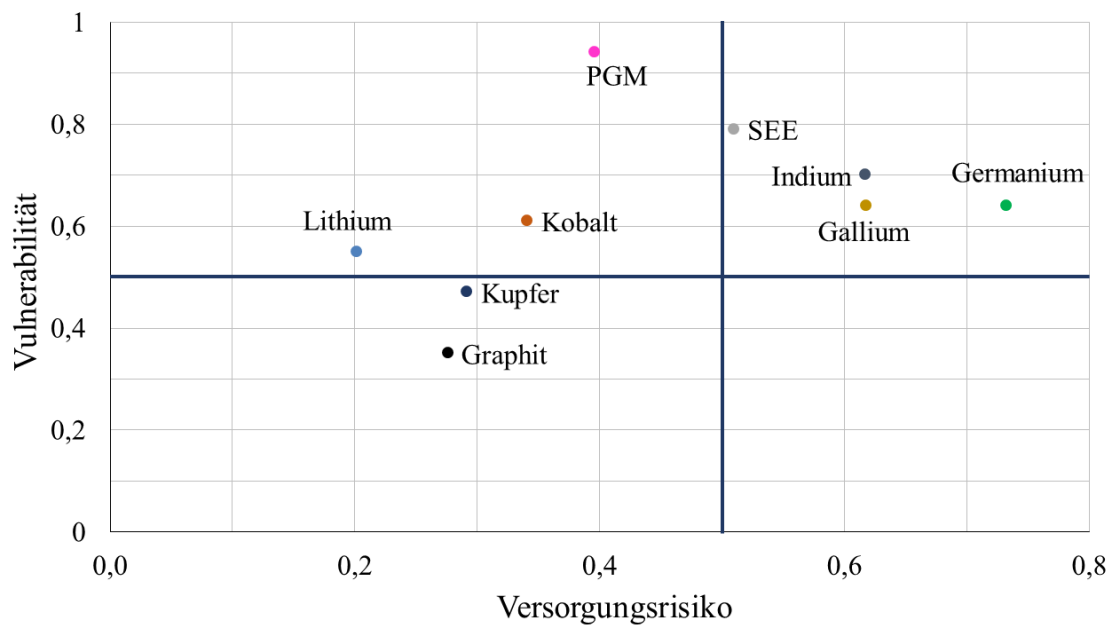


Abbildung 7.2: Rohstoffmodell – Szenario 2: Elektrowelt

Szenario 3: Wasserstoffwelt Abschließend werden in *Abbildung 7.3* die Ergebnisse der Untersuchungen in der Wasserstoffwelt gezeigt. Auch hier ist keine Veränderung der Vulnerabilität zu erkennen, im Vergleich zur Elektrowelt ist aber ein noch höheres Versorgungsrisiko bei den Rohstoffen Graphit, Platingruppenmetalle und Indium zu erwarten.

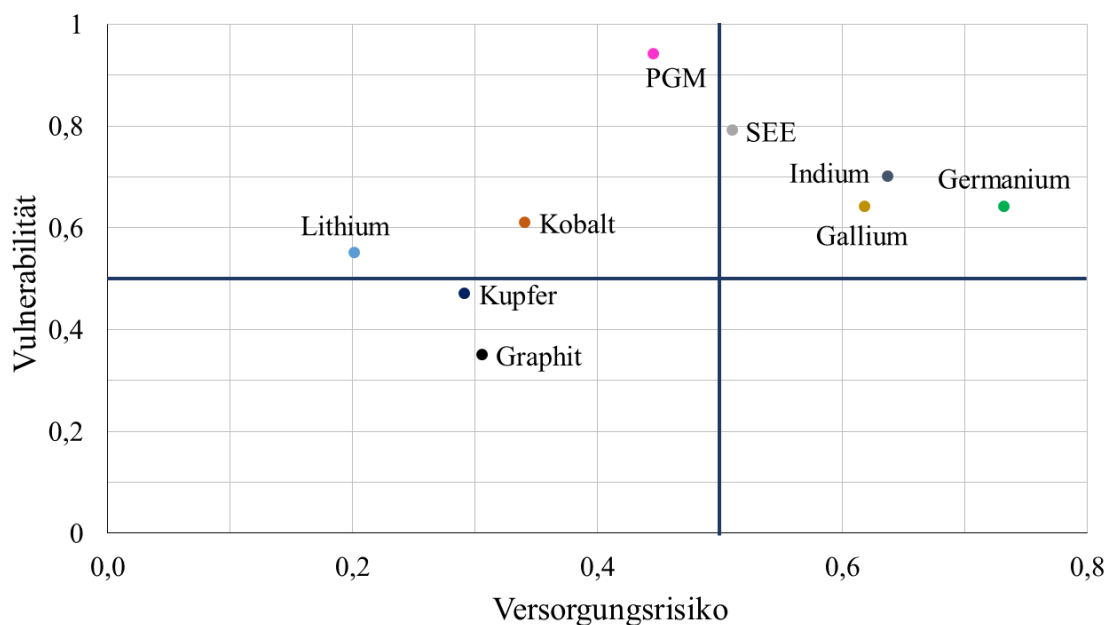


Abbildung 7.3: Rohstoffmodell – Szenario 3: Wasserstoffwelt

Zusammenfassung Die Erkenntnisse bezüglich der Kritikalität der Rohstoffe werden in *Tabelle 7.13* wiedergegeben, wobei „-“ (minimales Risiko) und „++“ (maximales Risiko) entspricht. Die Rohstoffe unterteilen sich hinsichtlich ihrer Kritikalität in drei Gruppen. Ein geringes Risiko bedeutet, dass beide Indikatoren – Versorgungsrisiko und Vulnerabilität – gering sind, bei mittlerem Risiko ein Faktor gering und der zweite hoch bewertet wird und bei hohem Risiko beide Faktoren mit hoch bewertet werden.

Tabelle 7.13: Zusammenfassung der Ergebnisse des Rohstoffmodells

| | | Versorgungsrisiko | Vulnerabilität |
|------------------|-----------|-------------------|----------------|
| Geringes Risiko | Graphit | - | -- |
| | Kupfer | - | - |
| | Lithium | -- | + |
| | Kobalt | - | + |
| Mittleres Risiko | PGM | - | ++ |
| Hohes Risiko | SEE | + | ++ |
| | Indium | ++ | + |
| | Gallium | ++ | + |
| | Germanium | ++ | + |

Im Vergleich mit [3] und [82] zeigen die Ergebnisse ähnliche Resultate. Unterschiede sind jedoch zu erwarten, die aber auf (1) eine neuere Datenlage in dieser Arbeit, (2) einen Fokus auf die Automobilindustrie und (3) einen größeren Fokus auf die zukünftigen Entwicklungen bis 2030 zurückzuführen sind. Auch in [4] werden die Erkenntnisse im Wesentlichen bestätigt. Allerdings sind auch hier aufgrund der oben angeführten Gründe Unterschiede zu erkennen.

7.4 Implikation des Rohstoffrisikos für die Fahrzeugherstellkosten

Sowohl im Nachfragemodell (siehe *Kapitel 5*) als auch im Angebotsmodell (siehe *Kapitel 6*) wurden Fahrzeugherstellkosten ermittelt, wobei unterschiedliche Szenarien bei den Rohstoffpreisen (siehe *Abschnitt 4.3*) berücksichtigt worden sind. In diesen Szenarien wurde, außer bei Szenario X, davon ausgegangen, dass sich alle Rohstoffe gleich verhalten. Die Ergebnisse des vorhergehenden Abschnittes zeigen aber, dass das Risiko bei einigen Rohstoffen höher ist als bei anderen. Ein höheres Risiko impliziert zwar nicht automatisch auch höhere Preise, aber die Wahrscheinlichkeit ist

höher.

Es soll daher in diesem Abschnitt untersucht werden, wie sich die Herstellkosten der Fahrzeuge bis 2030 entwickeln, wenn die Absatzzahlen wie im Angebotsmodell gewählt werden und die einzelnen Rohstoffpreise unterschiedliche Entwicklungen aufzeigen. Es wird davon ausgegangen, dass die Preise von jenen Rohstoffen, welche in *Abschnitt 7.3* ein hohes Risiko erwarten lassen, einer jährlichen Steigerung von 10 % unterliegen, jene Rohstoffe mit mittlerem Risiko von 5 % und jene mit geringem Risiko auf dem Niveau von 2010 verbleiben.

In der nachstehenden *Abbildung 7.4* werden die Ergebnisse der Untersuchung wie im Angebotsmodell dargestellt. Auch hier repräsentieren die durchgezogenen Linien die Fahrzeugherstellkosten, wenn alle Rohstoffpreise auf dem Niveau von 2010 bleiben. Die strichlierten Linien sind die Herstellkosten der Fahrzeuge, bei Rohstoffpreisentwicklung wie im Absatz zuvor beschrieben. Eine Analyse der Verläufe bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen ist bereits im *Kapitel 6* durchgeführt worden, es werden daher jetzt lediglich die Unterschiede und Merkmale beleuchtet.

Es ist ersichtlich, dass die Herstellkosten für das CV im zeitlichen Verlauf, wie auch im Vergleich zu den Kosten bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen nur geringfügig um 1,2 % im Jahr 2030 steigen. Diese Entwicklung ist in allen Absatzwelten zu bemerken. Beim PHEV, REX und BEV ist zu erwarten, dass die Herstellkosten dieser drei Konzepte unter jenen des Jahres 2020 liegen und weit unter jenen des Jahres 2010. Anders sind die Entwicklungen des FCEV, bei dem zwar die Herstellkosten von 2010 bis 2020 sehr stark abfallen, jedoch danach wieder leicht ansteigen. Es ist daher zu erwarten, dass die Herstellkosten aller Fahrzeuge, außer dem CV, bis 2030 fallen werden.

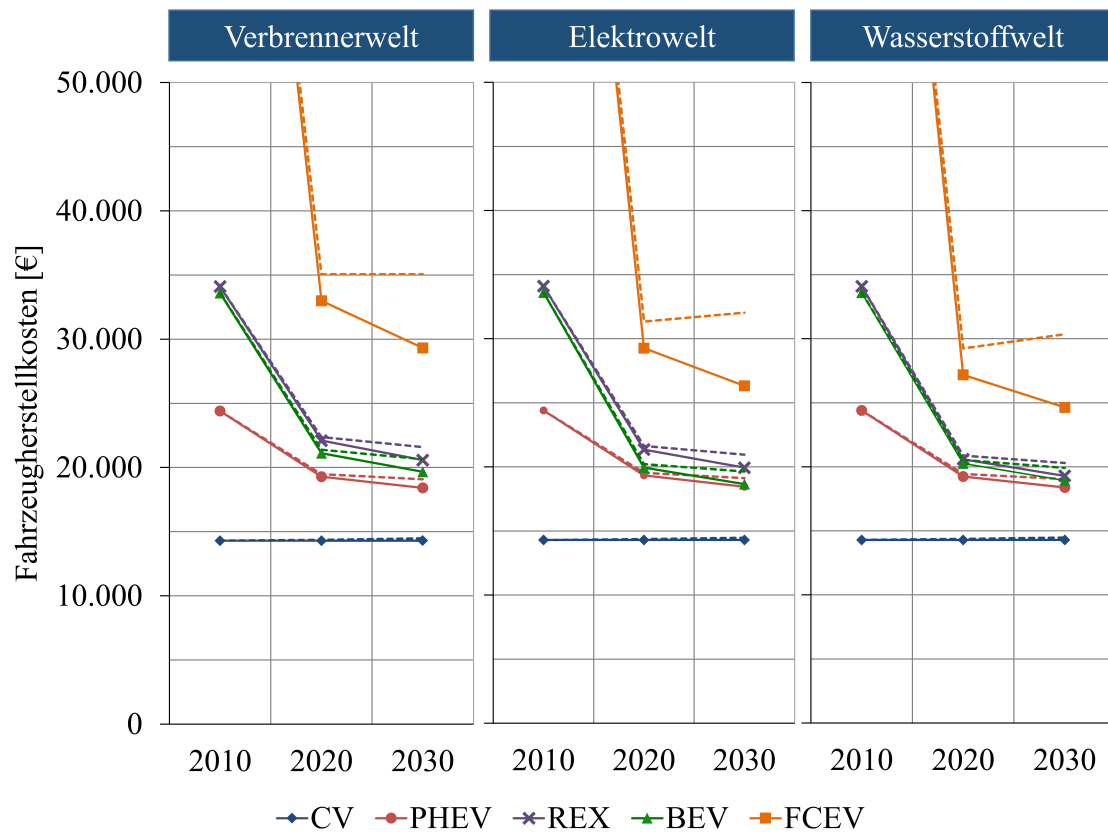


Abbildung 7.4: Entwicklung der Fahrzeugkosten bei unterschiedlichen Rohstoffpreisentwicklungen

Kapitel 8

Diskussion der Modelle

Die Ergebnisse der erstellten Modelle basieren auf Annahmen, die aufgrund von Experteneinschätzungen, Kundenbefragungen und Marktuntersuchungen gewählt worden sind und zu Ungenauigkeiten führen. Daraus entstehende Fehler werden in diesem Kapitel untersucht und beschrieben. So wird zum Beispiel durch die Entwicklung von Rohstoffpreisszenarien versucht, die Auswirkungen auf die Herstellkosten zu berechnen. Dafür wurden aus der Literatur durch Experten geschätzte Lernraten (siehe *Abschnitt 4.2.2*) übernommen, jedoch unterliegen diese den angesprochenen Unsicherheiten. In *Abschnitt 8.2* wird der Einfluss der Lernrate durch Variation dieser untersucht.

Eine weitere Unsicherheit entsteht durch die im Nachfragemodell benutzten Kundenanforderungen. Sie entstammen Markt- und Kundenbefragungen, die die Anforderungen der Kunden, die zu Beginn des Betrachtungshorizonts bestehen, abbilden. Diese könnten sich jedoch durch eine Veränderung der äußeren Gegebenheiten ändern. In *Abschnitt 8.3* wird daher auf jene eingegangen und abgeschätzt.

Abschließend soll noch auf die Ungenauigkeiten des letzten Modells, dem Rohstoffmodell, eingegangen werden, die sich durch die Gewichtung der Indikatoren ergeben.

8.1 Herstellkosten der Fahrzeuge

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Fahrzeugkosten, in Abhängigkeit von den Produktionszahlen, wird in *Abschnitt 4.2* beschrieben. In *Tabelle 4.4* sind die für diese Arbeit gewählten Herstellkosten der Fahrzeuge für das Jahr 2010 angeführt, welche auf den Daten der Studie [22] basieren.

Betrachtet man die Herstellkosten der Fahrzeuge, dann kann festgestellt werden, dass (1) davon ausgegangen wird, dass sie weltweit gleich sind und (2) sie, im Vergleich mit den tatsächlichen Verkaufspreisen, hoch sind. Um den Einfluss dieser Daten zu untersuchen, werden die Kosten für 2010 reduziert (siehe *Tabelle 8.1*).

Tabelle 8.1: Herstellkosten nach Antriebskonzepten im Jahr 2010 [€] [22], [Eigene Berechnung]

| | CV | PHEV | REX | BEV | FCEV |
|--|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Verbrennungskraftmaschine | 1.350 | 900 | 200 | - | - |
| Elektromotor | - | 500 | 900 | 900 | 900 |
| Brennstoffzellen-Stack | - | - | - | - | 40.000 |
| Energiespeicher (ohne Traktionsbatterie) | 150 | 150 | 100 | 100 | 100 |
| Traktionsbatterie | - | 6.700 | 14.000 | 14.000 | 3.000 |
| Wasserstofftank | - | - | - | - | 35.000 |
| Steuer- und Leistungselektronik | - | 200 | 300 | 300 | 300 |
| Antriebsstrang | 300 | 300 | 150 | 150 | 150 |
| Thermo-Management | - | 300 | 300 | 300 | 300 |
| Abgasnachbehandlung | 400 | 250 | 100 | - | - |
| Unveränderte Komponenten | 7.000 | 7.000 | 7.000 | 7.000 | 7.000 |
| Summe | 9.200 | 16.300 | 23.050 | 22.750 | 86.750 |

In *Abbildung 8.1* werden die Ergebnisse der Untersuchung aus dem Angebotsmodell bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen dargestellt. Sie zeigen, dass keines der neuen Fahrzeugkonzepte, unabhängig von der Nachfrage und dem Jahr, die Kosten des CV erreichen wird. Nachdem der relative Unterschied zwischen den Fahrzeugkonzepten weiterhin besteht, kann nicht damit gerechnet werden, dass sich die Absatzahlen verändern werden.

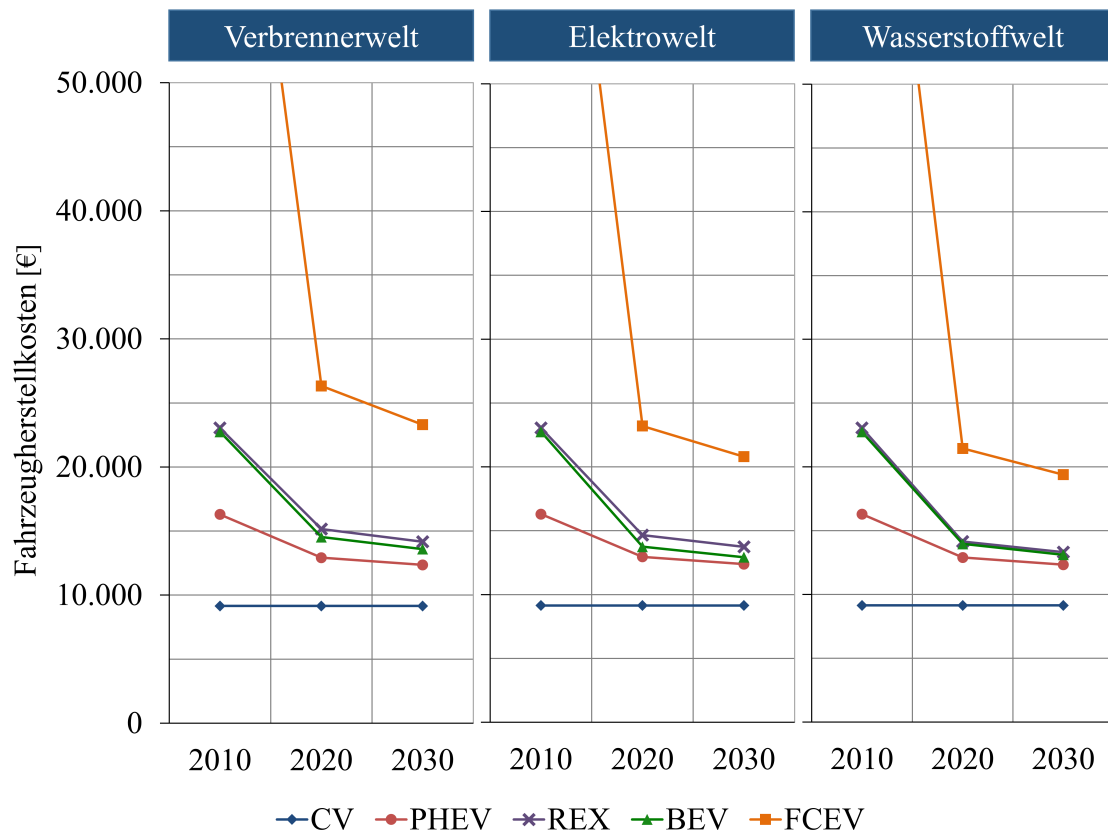


Abbildung 8.1: Entwicklung der Fahrzeugkosten bei veränderten Herstellkosten im Jahr 2010

8.2 Lernrate

Die Berechnung der Herstellkosten der Fahrzeuge teilt sich in jene, die durch die Fertigung und in jene, die durch die Rohstoffe entstehen. Wie sich die Fertigungskosten im Allgemeinen berechnen, wird in *Formel 4.8* beschrieben. Nun unterliegen nicht alle Komponente, derselben Lernrate, weshalb sie in *Tabelle 4.5* für die unterschiedlichen Komponenten angegeben werden. Sowohl im Angebotsmodell, als auch im Nachfragemodell werden die Herstellkosten auf Basis dieser Angaben berechnet.

8.2.1 Zielkosten: Fahrzeug

In *Abbildungen 10.1* kann man nun sehen, dass zum Beispiel die Traktionsbatterie bei einer Lernrate von 7 % und bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen im Jahr 2020 Herstellkosten von etwa 500 €/kWh und im Jahr 2030 von etwa 450 €/kWh aufweist. In der Literatur findet man durch Experten geschätzte Werte, wie sich die

Fahrzeugkosten bis 2030 voraussichtlich entwickeln. Diese unterscheiden sich jedoch oft stark voneinander. In [22] wird davon ausgegangen, dass die Herstellkosten der Batterie bei etwa 300 €/kWh im Jahr 2030 liegen. Im Vergleich dazu wird in [87] erwartet, dass sich die Kosten voraussichtlich in Richtung 475 €/kWh entwickeln und in [88] sogar in Richtung 200 bis 329 €/kWh in 2030.

Um die Auswirkungen durch die Lernraten abschätzen zu können, verändert man sie dementsprechend, sodass die Herstellkosten des BEV bis 2030 denen des CV bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen in der Verbrennerwelt entsprechen. In *Tabelle 8.2* sind die angepassten Werte für die Lernrate angeführt, wobei die Lernrate nur von jenen Komponenten verändert worden ist, die auch davor schon eine hatten. Die jener Komponenten, die komplett neu sind, wie zum Beispiel die Traktionsbatterie oder die Brennstoffzelle, werden stärker angehoben, als jene die es am Markt schon seit längerem gibt, wie dem Elektromotor.

Tabelle 8.2: Kostenreduzierungspotenziale für E-Komponenten

| | Lernrate [%] | Jährliche Verbesserung [%] |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| Verbrennungskraftmaschine | 0 | 0 |
| Elektromotor | 14,0 | 3,4 |
| Brennstoffzellen-Stack | 23,0 | 4,0 |
| Energiespeicher | 0 | 0 |
| Traktionsbatterie | 14,0 | 4,0 |
| Wasserstofftank | 19,0 | 5,0 |
| Antriebsstrang | 0 | 0 |
| Steuer- und Leistungselektronik | 15,0 | 5,0 |
| Thermo-Management | 2,0 | 1,5 |
| Abgasnachbehandlung | 0 | 0 |

Die angepassten Ergebnisse sind in *Abbildung 8.2* dargestellt. Wie zuvor besprochen, wurden die Lernraten so angepasst, dass das BEV im Jahr 2030 etwa dieselben Herstellkosten wie das CV hat. Dies führt auch dazu, dass die Kosten des REX denen des CV ähnlich sind. Das PHEV würde wesentlich weniger von den Reduktionen profitieren als die beiden anderen Konzepte. Das FCEV würde dennoch etwa um 5.0 Tsd. € teurer sein als das CV und BEV.

In der Elektrowelt und der Wasserstoffwelt ist das BEV sogar günstiger als das CV. Das PHEV würde mit 15.6 Tsd. € in allen drei Welten sehr ähnliche Herstellkosten aufweisen. Die Entwicklung der Herstellkosten des FCEV ist in der Elektrowelt und Wasserstoffwelt sehr positiv zu sehen und kann unter die Marke von 20 Tsd. € fallen.

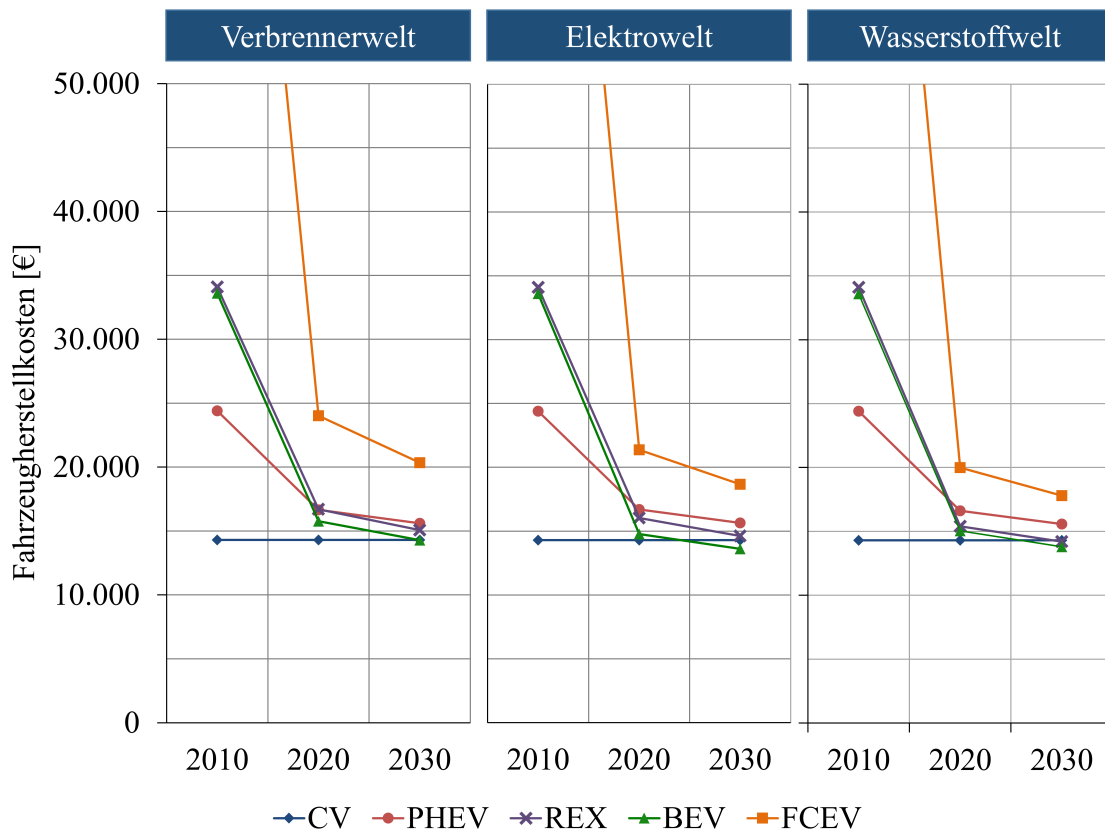


Abbildung 8.2: Entwicklung der Fahrzeugherstellkosten bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen und Zielkosten des BEV wie die des CV

Die Kostenpotenziale können nur realisiert werden, wenn die Potenziale einzelner Komponenten, wie die der Traktionsbatterie, der Brennstoffzelle usw., ausgenutzt werden. Bei den oben berechneten Herstellkosten würden die Herstellkosten für die Produktion der Batterie im Durchschnitt im Jahr 2020 bei etwa 280 €/kWh und 220 €/kWh im Jahr 2030 liegen. Die Kosten für das Brennstoffzellen-Stack würden im Durchschnitt auf 54 €/kW im Jahr 2020 und auf 46 €/kWh im Jahr 2030 fallen. Das würde rund der Hälfte der Herstellkosten entsprechen, die zuvor berechnet worden sind.

8.2.2 Zielkosten: Traktionsbatterie

Wie im Abschnitt zuvor beschrieben, wurden die Lernraten so verändert, dass die Herstellkosten des BEV denen des CV entsprechen. So ergeben sich durchschnittliche Herstellkosten für die Traktionsbatterie von 220 €/kWh im Jahr 2030. Experten schätzen, dass die Kosten bereits im Jahr 2020 unter 200 €/kWh liegen können

[89]. In diesem Abschnitt werden die Lernraten so angepasst, dass die Kosten der Traktionsbatterie entsprechend reduziert werden.

Daraus ergibt sich eine Lernrate (siehe *Abschnitt 4.2.2*) von 21 %, wobei dadurch die durchschnittlichen Herstellkosten der Traktionsbatterie bei unter 200 €/kWh im Jahr 2020 und 142 €/kWh im Jahr 2030, bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen, liegen. *Abbildung 8.3* zeigt die Auswirkungen auf die Herstellkosten der Fahrzeuge.

Die Entwicklung der Herstellkosten der Fahrzeuge ist in allen drei Welten ähnlich. Schon ab 2020 werden die Kosten des REX und BEV in allen drei Welten (siehe *Kapitel 6*) unter denen des CV liegen. Das REX hat im Jahr 2030 Herstellkosten von 13.0 Tsd. € in der Verbrennerwelt; 12.8 Tsd. € in der Elektrowelt und 12.5 Tsd. € in der Wasserstoffwelt. Analog dazu liegen die Kosten des BEV bei 12.3 Tsd. €; 12.0 Tsd. € und 12.1 Tsd. €. Daraus resultiert, dass der relative Anteil der Rohstoffkosten im Vergleich zu den Fertigungskosten steigt und die gesamten Fahrzeugherstellkosten schneller auf die Entwicklung der Rohstoffpreise reagieren werden.

Das PHEV wird zunächst im Jahr 2020 noch höhere Herstellkosten als das CV haben, jedoch werden sie sich 2030 anpassen. Das FCEV hat als einziges Fahrzeugantriebskonzept auch innerhalb des Betrachtungshorizontes Kosten über denen des CV. Im Jahr 2030 liegen sie bei 15.8 Tsd. € in der Verbrennerwelt, 15.2 Tsd. € in der Elektrowelt und 14.9 Tsd. € in der Wasserstoffwelt.

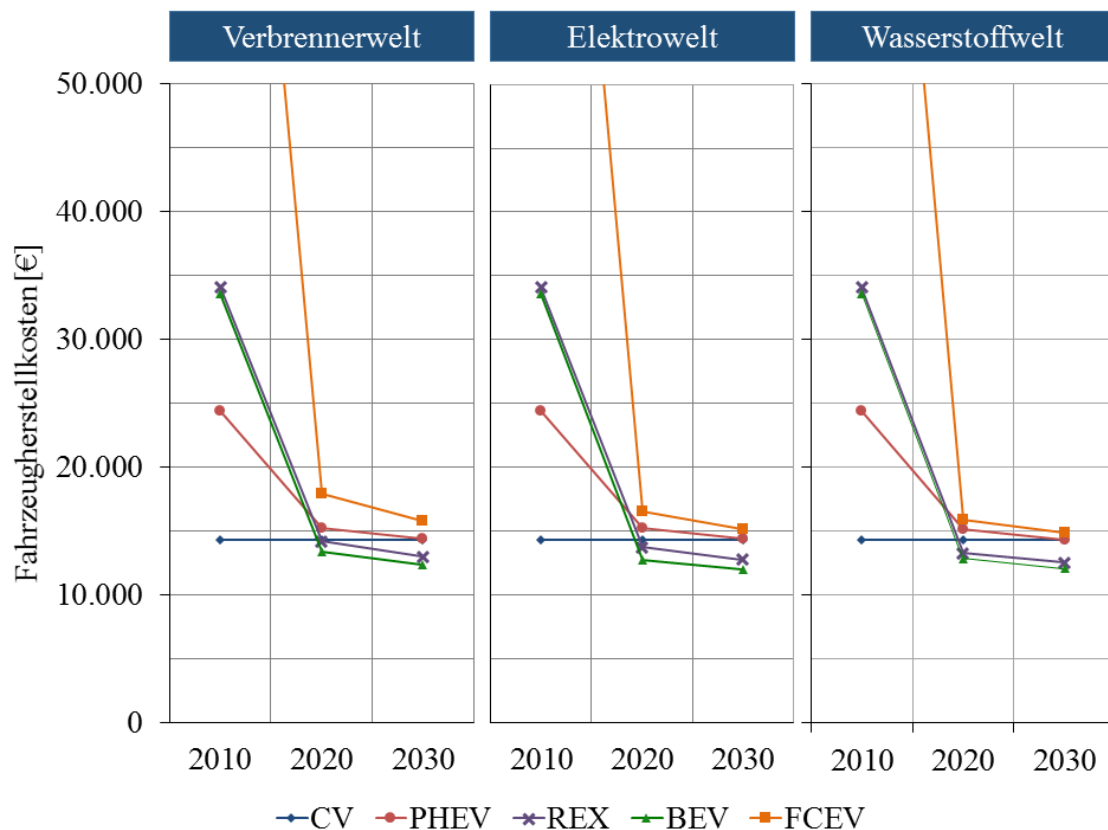


Abbildung 8.3: Entwicklung der Fahrzeugherstellkosten bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen und Zielkosten der Traktionsbatterie von unter 200 €/kWh

Parallel dazu werden die Produktionszahlen (siehe *Abbildung 8.4*) und Herstellkosten, aufbauend auf der Methode aus dem Nachfragemodell (siehe *Kapitel 5*), berechnet. Offensichtlich ist, dass jene Antriebskonzepte mit Verbrennungskraftmaschine auch im Jahr 2030 dominieren werden, das PHEV jedoch die Produktionszahlen des CV übersteigen wird. 24 % der produzierten Fahrzeuge sind entweder REX oder BEV.

Die Herstellkosten des PHEV (14.2 Tsd. €) liegen bei den ermittelten Produktionszahlen, sowie die des REX (13.5 Tsd. €) und BEV (14.2 Tsd. €) im Jahr 2030 unter denen des CV. Das FCEV (19.2 Tsd. €) hat auch hier höhere Kosten als das CV. Im Modell wird nicht berücksichtigt, dass bei der aufgezeigten Kosten- und Produktionsentwicklung die Konfiguration der Fahrzeuge geändert werden könnte. Zum Beispiel ist es möglich, dass höhere Batteriekapazitäten verbaut werden, was wiederum zu höheren Reichweiten und höheren Produktionszahlen führen würde.

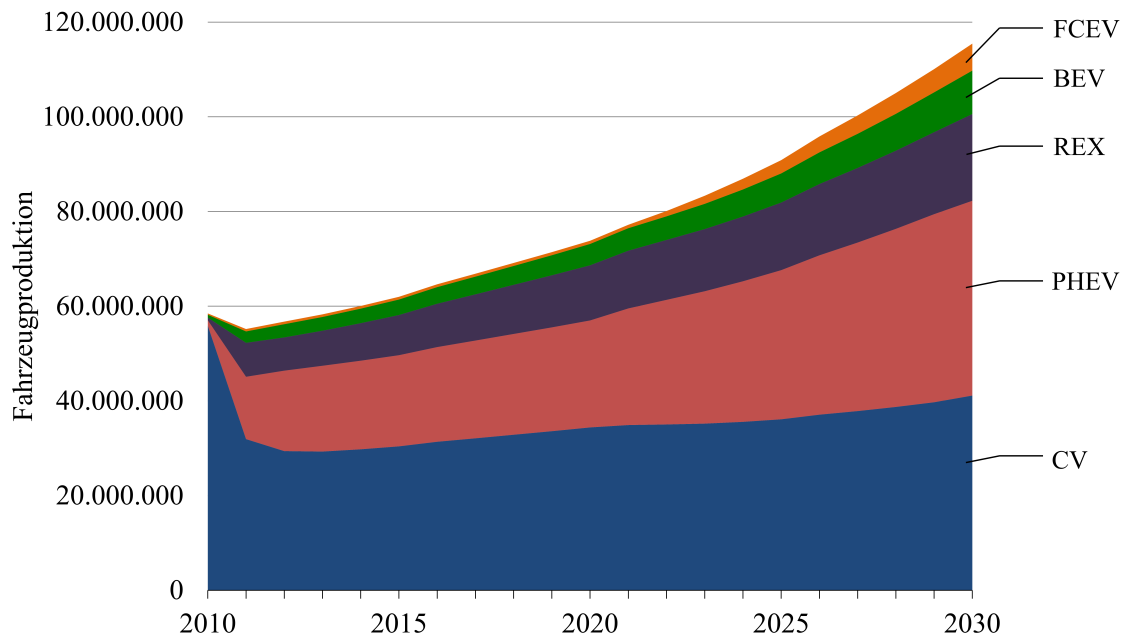


Abbildung 8.4: Entwicklung der Fahrzeugproduktion bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen (Szenario I) und Zielkosten der Traktionsbatterie von unter 200 €/kWh

8.3 Veränderung der Kundennachfrage

Im Nachfragemodell wird, im Unterschied zum Angebotsmodell, die Verteilung der Absatzzahlen in Abhängigkeit von den Anforderungen der Kunden ermittelt. Es wurde daher aufgrund von Markterhebungen analysiert, welche Reichweiten, Ladedauer und welchen Anschaffungspreis die Kunden akzeptieren würden. Diese haben aber gezeigt, dass sich die Werte sehr stark an heute üblichen, durch das CV geprägten, Werten orientieren. Es kann erwartet werden, dass diese Anforderungen über den gesamten Betrachtungshorizont nicht gleich sind.

Man untersucht daher, welche Auswirkungen auf die Absatzzahlen und in weiterer Folge auf die Fahrzeugherstellkosten zu erwarten sind, wenn die Kundenanforderungen über den Betrachtungszeitraum nicht konstant gehalten werden. Dazu werden die akzeptierten Reichweiten, Ladedauer und Preisdifferenz ab dem Jahr 2020 erhöht. In den *Tabellen 8.3-8.5* sind die geänderten akzeptierten Werte angeführt.

Die Absatzzahlen in *Abbildung 8.5* wurden in Anlehnung an die Methode aus dem Nachfragemodell, siehe *Kapitel 5* ermittelt. Durch die veränderte Kundenakzeptanz im Jahr 2020 kommt es in diesem Jahr zu einem Knick, bedingt durch die Me-

Tabelle 8.3: Akzeptierte Reichweite ab 2020

| Reichweite [km] | Kundenakzeptanz |
|------------------------|------------------------|
| 0-100 | 16 % |
| 0-150 | 28 % |
| 0-200 | 48 % |
| 0-300 | 78 % |
| 0-400 | 100 % |

Tabelle 8.4: Akzeptierte Ladedauer ab 2020

| Ladedauer [min] | Kundenakzeptanz |
|------------------------|------------------------|
| 0-60 | 70 % |
| 0-120 | 80 % |
| 0-300 | 100 % |

thode – die Ermittlung der Werte wird nur einmal je Jahr durchgeführt – entsteht. Grundsätzlich ist aber zu erkennen, dass die Fahrzeugproduktion der einzelnen Konzepte, bis auf CV, steigen. Jene Antriebskonzepte mit Verbrennungskraftmaschinen sind auch weiterhin die dominierenden Konzepte. Im Jahr 2030 sind folglich auch weiterhin 92 % der gesamten Fahrzeugproduktion entweder CV oder PHEV.

Die Produktion der anderen Konzepte würde durchgehend ansteigen, im Vergleich zu den Zahlen bei konstanter Kundenakzeptanz. So würden 2030 circa 4,9 % der gesamten Produktion BEV sein, im Vergleich zu 3,3 %, REX 2,8 % zu 1,5 % und FCEV 0,4 % zu 0,7 %. Zusammengefasst lässt sich dennoch sagen, dass aufgrund der hohen Kosten die Fahrzeugkonzepte REX, BEV und FCEV auch 2030 nicht dominieren werden, wohl werden aber etwa 27 % der gesamten Produktion an Fahrzeugen einen Elektromotor im Antriebsstrang haben.

Tabelle 8.5: Akzeptierter Anschaffungspreis ab 2020

| Kostendifferenz [€] | Kaufbereitschaft |
|---------------------|------------------|
| 0-1.000 | 60,0 % |
| 1.001-2.500 | 40,0 % |
| 2.501-5.000 | 18,0 % |
| 5.001-10.000 | 4,0 % |
| 10.001-15.000 | 3,0 % |
| 15.001-20.000 | 2,0 % |
| 20.001-25.000 | 1,0 % |

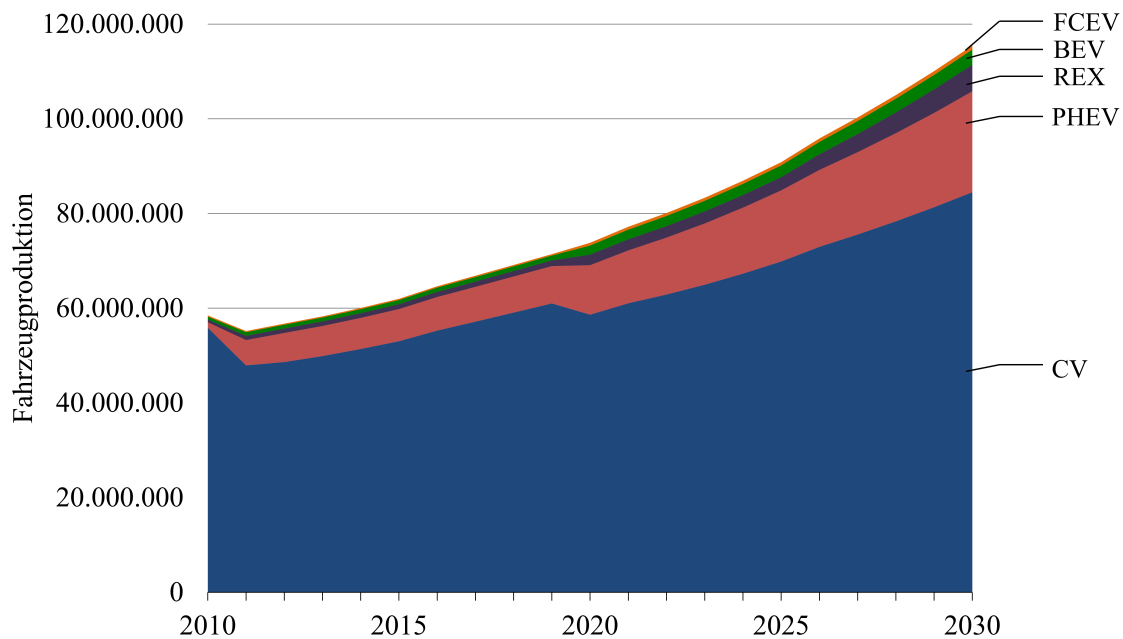


Abbildung 8.5: Entwicklung der Fahrzeugproduktion bei gleichbleibenden Rohstoffpreisen (Szenario I) und veränderten Kundenanforderungen

8.4 Einfluss der Gewichtungen der Faktoren im Rohstoffmodell

Um auch die Unsicherheiten im Rohstoffmodell abschätzen zu können, sollen die Gewichtungen der Faktoren innerhalb der beiden Indikatoren variiert werden. Wie sie berechnet werden, wird in *Kapitel 7* ausführlich besprochen. Die einzelnen Faktoren wurden zur Berechnung gewichtet, wobei die Summe den Wert des Indikators eines Rohstoffes bestimmt. Zur Fehlerabschätzung werden sie daher innerhalb des Indikators gleich bewertet, es haben somit alle den gleichen Einfluss.

In *Abbildung 8.6* ist das Ergebnis der Kritikalitätsuntersuchung in der Wasserstoffwelt bei gleichverteilter Gewichtung wiedergegeben. Es zeigt, dass diese dazu führt, dass das Risiko im Allgemeinen geringer eingeschätzt wird. Dennoch erreichen Graphit, Kupfer, Lithium und Kobalt ein geringes Risiko und die seltenen Erden, Gallium, Indium und Germanium eine hohe Kritikalität. Im Unterschied zu den vorhergehenden Ergebnissen würden die Platingruppenmetalle auch mit einem hohen Risiko bewertet werden.

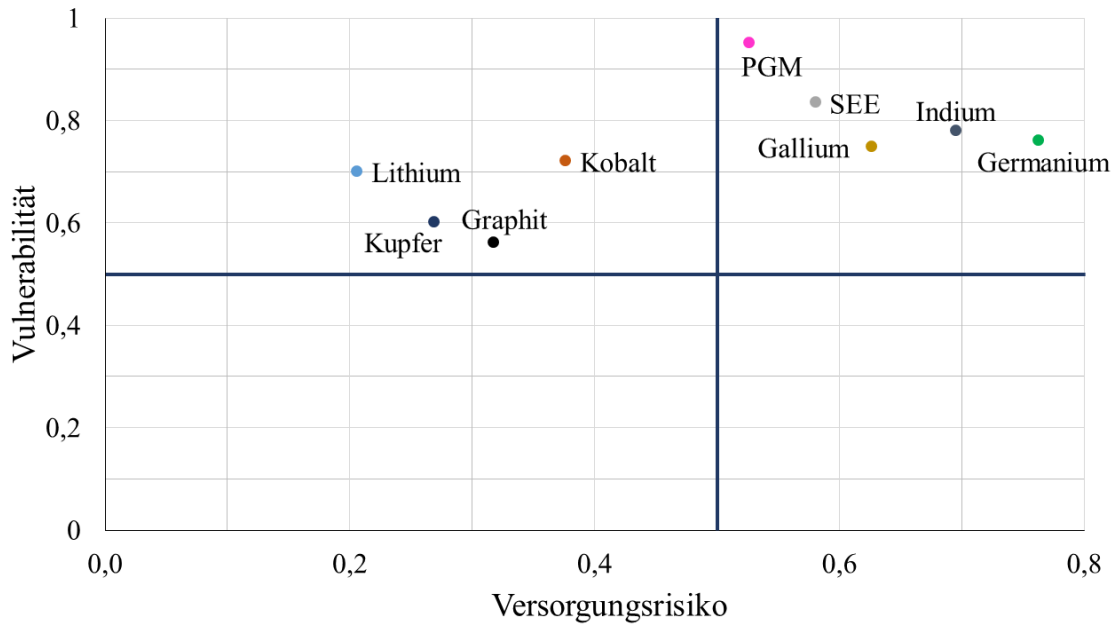


Abbildung 8.6: Rohstoffmodell – Szenario 3: Wasserstoffwelt mit gleichverteilter Gewichtung der Faktoren

Kapitel 9

Zusammenfassung

Steigende Fahrzeugdichten, Bevölkerungszahlen, Rohstoffpreise, sowie immer stärker steigende CO_2 -Emissionen kann man, neben den resultierenden Folgen, in den vergangenen Jahren als Schlagzeilen der Zeitungen lesen. Das Auto wird oftmals als Sündenbock hingestellt. Der Druck auf und durch die Politik, Gesellschaft und Autohersteller ist dadurch massiv angestiegen. Neben den Versuchen, Mobilität im Ganzen zu überdenken, wird Elektromobilität als Lösung verstanden, um den motorisierten Individualverkehr energie- und emissionseffizient zu gestalten.

Für die Fahrzeuge jedoch werden neue Technologien benötigt, die im Vergleich zu jenen die im Konventionellen Fahrzeug (CV) eingesetzt werden, einen veränderten Rohstoffbedarf haben. Diese Arbeit hat daher zum Ziel, zu beantworten, ob der Absatz von neuen PKW-Antriebskonzepten durch einzelne Rohstoffe bis 2030 beeinflusst wird. Dafür werden zunächst mögliche Antriebskonzepte analysiert und fünf, aus heutiger Sicht, technisch machbare Konzepte erarbeitet. Das Plug-In Hybrid Fahrzeug (PHEV), welches auch Full Hybrid abdeckt, ist das erste Fahrzeugkonzept, das betrachtet wird. Als Übergang zum Batterie-Elektrischen-Fahrzeug (BEV), wird das Range-Extender-Fahrzeug (REX) verstanden. Es ist hinsichtlich der Motorleistung und Batteriekapazität gleich wie das BEV, jedoch ist noch eine kleine Verbrennungskraftmaschine für den Notfall dabei. Das Brennstoffzellen Elektrische Fahrzeug (FCEV) ist bezüglich der Motorleistung ebenfalls gleich wie das BEV, wobei stellte eine Brennstoffzelle elektrische Energie in Kombination mit einem Wasserstofftank zur Verfügung. Als Vergleich dient das CV, das zunächst noch keinen Elektromotor zum Antrieb besitzt und die beiden kleinen Micro- und Mild- Hybrid abdeckt.

Im Anschluss werden jene kritischen Rohstoffe analysiert, die den Absatz beeinflussen könnten und der Bedarf je PKW-Konzept bestimmt. Dabei werden die

Rohstoffe: Kobalt, Kupfer, Lithium, Grafit, Indium, Gallium, Germanium, Seltene Erden und Platingruppenmetalle identifiziert. Gefolgt wird die Analysen von einer Abschätzung des gesamten Fahrzeugbestandes und Absatzes bis 2030, unter Berücksichtigung der weltweiten Bevölkerung, der Fahrzeugdichte und deren Entwicklungen. Neben der Tatsache, dass ab dem Jahr 2023 das erste Mal mehr Fahrzeuge in den weniger entwickelten, als in den entwickelten Regionen geben wird, wird sich der weltweite Fahrzeugbestand im Jahr 2030 auf 1.85 Milliarden Fahrzeuge im Vergleich zu 2010 (854 Millionen Fahrzeuge) mehr als verdoppeln. Um die Fahrzeugproduktion ermitteln zu können, muss nicht nur der Fahrzeugbestandszuwachs berücksichtigt, sondern auch jene Fahrzeuge, die verschrottet bzw. gegen ein neues Fahrzeug ausgetauscht werden. Es könnte über die Jahre steigende Produktionszahlen ermittelt werden, die im Jahr 2020 von 90 Millionen und 2030 von 148 Millionen Fahrzeugen erwarten lässt.

Um nun in Folge analysieren zu können, welche Einflüsse die Rohstoffe auf die Herstellkosten der Fahrzeuge haben, müssen die Kosten hinsichtlich ihrer Produktionsfaktoren aufgeteilt werden. Die Kosten werden daher in Rohstoffkosten und in Fertigungskosten aufgeteilt. Die Rohstoffkosten pro Komponente sind das Produkt aus Rohstoffpreisen und den eingesetzten Rohstoffmenge. Die Summe aus den einzelnen Rohstoffkosten ergeben die gesamten Rohstoffkosten für das Fahrzeug.

Die Fertigungskosten sind jene, die durch die Umwandlung von Produkten entstehen. Sie sinken mit steigenden Stückzahlen in Abhängigkeit von der Lernrate. Ausgegangen wird von den Herstellkosten der einzelnen Antriebskonzepte im Jahr 2010.

Aufbauend auf die gewonnenen Grundlagen werden drei Modelle: Nachfrage-, Angebots- und Rohstoffmodell erstellt, mit deren Hilfe die zentrale Frage beantwortet werden kann.

Nachfragemodell Im Nachfragemodell, wird die Entwicklung des Fahrzeugabsatzes unter Berücksichtigung der Kunden bzw. deren Anforderungen hinsichtlich Kosten, Reichweite und Ladedauer, sowie technische Weiterentwicklungen, ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verbrennungskraftmaschine innerhalb des Betrachtungszeitraums der dominierende Energiewandler, unabhängig von der Entwicklung der Rohstoffpreise, bleibt. Es wird aber zu einer Verschiebung vom CV zum PHEV, hinsichtlich der Absatzzahlen, bis 2030 kommen.

Das BEV zeigt, unabhängig von den Rohstoffpreisen, nur geringe Absatzzahlen, da die Faktoren Reichweite und Ladedauer diese beschränken. Dem REX kommt hier

zu gute, dass aufgrund der Verbrennungskraftmaschine geringfügig höhere Reichweiten zu erzielen sind. Dennoch werden nur geringfügig höhere Absatzzahlen festgestellt. Hohe Kosten sind der Grund, warum sich das FCEV innerhalb des Betrachtungszeitraums nicht etablieren kann. Daraus ist der Schluss zu ziehen, dass nicht nur die Kosten für die Kunden wesentlich sind, sondern auch die Faktoren Reichweite und Ladedauer keineswegs zu unterschätzen sind. Rohstoffpreise nehmen hier nur einen geringen Einfluss.

Angebotsmodell Im Angebotsmodell werden, unabhängig von den Kundenwünschen, mögliche Absatzmodelle – Verbrennerwelt, Elektrowelt und Wasserstoffwelt – vorgegeben. Dies ermöglicht, dass die Entwicklungen der Herstellkosten unabhängig vom heutigen Wissen, wie z. B. Technologiesprünge, Einflussnahme durch Politik wie Subventionen und noch nicht bekannte Kundenwünsche, prognostiziert werden können.

Es zeigt sich, dass die Herstellkosten des CV durch eine Veränderung der Rohstoffpreise beeinflusst werden, jedoch nur geringe Veränderungen festzustellen sind. Unabhängig von den Rohstoffpreisen werden die Herstellkosten aller anderen Fahrzeuge bis 2030, aufgrund der steigenden Stückzahlen, stark absinken, jedoch nicht die Kosten des CV erreichen. Die Überprüfung der Absatzzahlen unter Berücksichtigung der Kundenwünsche zeigt, dass die Absatzzahlen der Verbrennerwelt, die Absatzzahlen unter Berücksichtigung der Kundenanforderungen am besten trifft, und sogar mehr PHEV, REX und BEV abgesetzt werden können. Um die Zahlen der anderen Welten zu erreichen, wird eine Subventionierung der Kosten nicht ausreichend sein.

Rohstoffmodell Zur Beurteilung der Kritikalität von Rohstoffen bzw. deren veränderte Kritikalität durch den erreichten Absatz der Fahrzeugindustrie wird im Rohstoffmodell geklärt. Dazu wird ein Matrixkonzept entwickelt, welches zwei Indikatoren – Versorgungsrisiko und Vulnerabilität – zur Bestimmung der Kritikalität heranzieht. Im Versorgungsrisiko werden mögliche Gefahren, die direkt vom Rohstoff ausgehen, analysiert und bewertet. Dabei wird zwischen drei Arten von Risiken unterschieden: Länderrisiko, Marktrisiko und Strukturrisiko. Bei der Vulnerabilität, der Verwundbarkeit der Fahrzeugindustrie, wird zwischen der Mengendimension – Anteil am Weltverbrauch – und der strategischen Dimension – globaler Nachfrageimpuls und Substituierbarkeit – unterschieden. Es kommt so zu einer Unterteilung der Rohstoffe hinsichtlich ihrer Kritikalität in drei Gruppen:

- Geringes Risiko: Graphit, Kupfer, Lithium, Kobalt

- Mittleres Risiko: Platingruppenmetalle
- Hohes Risiko: Seltene Erden, Indium, Gallium, Germanium

Durch die Kombination des Nachfragemodells mit dem Angebotsmodell konnte untersucht werden, welche Auswirkungen zu erwarten sind, wenn die Herstellkosten von extern beeinflusst werden. Wobei nur untersucht wurde, wie mögliche Subventionen oder Marketingkonzepte auf den Absatz wirken. Es hat sich aber klar gezeigt, dass nur unter der Prämisse, dass auch die Reichweite und Ladedauer die Kundenanforderungen treffen, neue Antriebskonzepte eine Chance haben.

Neben den zuvor besprochenen Faktoren ist auch der Kostenfaktor sehr bestimmend, was dazu führt, dass das Brennstoffzellenfahrzeug innerhalb des betrachteten Zeithorizonts keine entscheidende Rolle spielt. Hinsichtlich der Herstellkosten haben mögliche Veränderungen der Rohstoffkosten einen zu geringen Anteil, um den Absatz nennenswert beeinflussen zu können.

Nachfragemodell-Absatzmodell-Rohstoffmodell Eine Überprüfung der Absatzzahlen aus dem Angebotsmodell unter Berücksichtigung der Kundenwünsche zeigt, dass die Zahlen der Verbrennerwelt, jene unter Berücksichtigung der Kundenanforderungen am besten trifft. Ein berücksichtigen eines möglichen Risikos durch die Rohstoffe hat gezeigt, dass die Herstellkosten der Fahrzeuge mit alternativen Antriebsstrang im Jahr 2030 unter denen aus dem Jahr 2010 liegen. Daraus kann abgeleitet werden, dass wegen der Kundenakzeptanz Produktionszahlen, wie sie in der Elektrowelt bzw. Wasserstoffwelt angenommen werden, nicht erreicht werden.

Ausblick Alle Ergebnisse zeigen, dass für eine erfolgreiche Positionierung der Elektromobilität am Fahrzeugmarkt die Herstellkosten massiv gesenkt werden müssen. Dies ist nur durch den Einsatz neuer Technologien und großen Anstrengungen zur Effizienzsteigerung bei der Herstellung möglich. Für Batterie-Elektrische- und Range-Extender-Fahrzeuge sind neue Technologien aber auch notwendig, um die von den Kunden geforderten Reichweiten und Ladedauer zu erfüllen. In naher Zukunft wird dafür der Antriebsstrang des Plug-In Hybrid Fahrzeugs eine nennenswerte Alternative zu den bisherigen Antriebskonzepten darstellen.

Die zentrale Frage, ob die Absatzentwicklung von neuen PKW-Antriebskonzepten (bis 2030) durch einzelne Rohstoffe beeinflusst werden, kann daher aufbauend auf die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit mit ja beantwortet werden, jedoch ist der

Einfluss durch andere Einflussfaktoren größer. Bei weiteren Untersuchungen müssen noch weitere Faktoren berücksichtigt werden:

- Zu Beginn wird der Fokus dieser Arbeit besprochen, dabei wird festgesetzt, dass Erdöl nicht berücksichtigt wird und somit auch nicht dessen Einfluss. Insbesondere die kurzfristige Verfügbarkeit, was sich wiederum auf die Kraftstoffpreise auswirkt, kann die Absatzentwicklung alternativer Antriebskonzepte beeinflussen.
- Die Verfügbarkeit der Rohstoffe maßgeblich von der politischen Situation der Abbauländer abhängt, wird in mehreren Kapiteln in dieser Arbeit besprochen. Viele Länder besitzen Rohstoffpläne, um die eigene Wirtschaft von den Entscheidungen anderer Länder zu „schützen“. Es werden daher strategisch und politische Entscheidungen getroffen, um einerseits kurzfristige Entwicklungen abzufedern, aber auch um langfristig die Wirtschaft zu unterstützen.
- Der Untersuchungsrahmen definiert, dass der Fokus dieser auf die Herstellung der Fahrzeuge gelegt wird, weshalb die Betankung bzw. Beladung der Fahrzeuge, die verfügbare Infrastruktur und die Gesamtbetriebskosten nicht als entscheidender Faktor für Kauf berücksichtigt wird.

Literaturverzeichnis

- [1] Großmann, H., Otto, A., Stiller, S., Wedermeier, J., Koller, C., Pflüger, W., und Roestel, A. *Berenberg Bank, HWWI: Strategie 2030 - Maritime Wirtschaft und Transportlogistik*. Berenberg Bank, Hamburg, 2006.
- [2] Pflieger, P., und Lichtblau, K. *Rohstoffsituation Bayern - keine Zukunft ohne Rohstoffe*. vbw - Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e.V., München, 2011.
- [3] N.N. *Critical raw materials for the EU- Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials*. European Commission, Brüssel, 2010.
- [4] U.S. Department of Energy. *Critical Material Strategy*. U.S. Department of Energy, Washington, DC., 2010.
- [5] N.N. *Mineral commodity summaries 2009:US Geological Survey*. U.S. Geological Survey, Virginia, 2009.
- [6] Degischer, H., Lüftl, S., Stepan, A., und Edl, B. *Leichtbau. Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten, Kapitel 7. Innovationsmanagement*. ISBN: 978-3-527-32372-2, Wiley, Weinheim, 2009.
- [7] Uhlmann, E. *Vorlesung: Motoren, Getriebe und Kupplungen*. Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, TU Berlin, Berlin, 2009.
- [8] Geringer, B. *Skriptum zur Vorlesung: KFZ-Technik Grundzüge SS2010*. Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, TU Wien, Wien, 2010.
- [9] N.N. *Statistik der Kraftfahrzeuge: Kfz-Neuzulassungen Jänner bis Dezember 2012*. ISBN: 978-3-902791-85-6, Statistik Austria, Wien, 2013.
- [10] Hofmann, P. *Hybridfahrzeuge*. ISBN: 978-3-211-89190-2, Springer-Verlag, Wien, 2010.

- [11] Rummich, E. *Energiespeicher- Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen*. ISBN: 978-3-8169-2736-5, Expert Verlag, Renningen, 2009.
- [12] Hatz, W. *Porsche Intelligent Performance - Effizienzstrategien der Zukunft im Sportwagen*. VDI Fortschritts-Bericht, 33. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2012.
- [13] Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A., und Olschewski, I. *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges*. ISBN: 978-3-8348-0847-9, Vieweg und Teubner, Wiesbaden, 2010.
- [14] Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Sektion IV - Energie und Bergbau. *Energiestatus Österreich 2012*. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Wien, 2012.
- [15] N.N. *Stromkennzeichnungsbericht*. Energie-Control Austria, Wien, 2012.
- [16] Schwingshackl, M. *Diplomarbeit: Simulation von elektrischen Fahrzeugkonzepten für PKW*. Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz, Graz, 2009.
- [17] Naunin, D., und et.al. *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen- Elektrofahrzeuge*. ISBN: 978-3-8169-2625-2, 4. Auflage, Expert Verlag, Renningen, 2007.
- [18] Geringer, B., Bauer, C., und Hofmann, P. *Formen der Elektromobilität - vom Mikrohybrid- bis zum Brennstoffzellenfahrzeug*. Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik B12028, Technische Universität Wien, 2012.
- [19] N.N. *Methodische Erläuterungen zu Statistiken über Fahrzeugzulassungen*. Kraftfahrt-Bundesamt, Fahrzeugstatistik, Flensburg, 2013.
- [20] Handelsblatt. *Die meistverkauften Autos aller Zeiten*. <http://www.daimler.com/technologie-und-innovation/antriebe/elektrische-antriebe/brennstoffzelle>. [Online; Abgerufen: 12.11.2013], 2012.
- [21] N.N. *REGULATION (EEC) No 4064/89 MERGER PROCEDURE*. Europäische Kommission, Brüssel, 1999.
- [22] Geringer, B., Sihn, W., Bauer, C., Gommel, H., Palm, D., und Tober, W. *Elektromobilität-Chance für die österreichische Wirtschaft*. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Wien, 2011.

- [23] Tober, W., und Geringer, B. *Batterieelektrische Fahrzeuge in der Praxis - Kosten, Reichweite, Umwelt, Komfort (Studie, 2. Auflage)*. Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK) und Österreichischen Automobil-, Motorrad und Touring Clubs (ÖAMTC), Wien, 2012.
- [24] Daimler AG. *Brennstoffzelle*. <http://www.daimler.com/technologie-und-innovation/antriebe/elektrische-antriebe/brennstoffzelle>. [Online; Abgerufen: 12.11.2013], 2013.
- [25] N.N. *28 Professoren der WKM äußern sich zur Zukunft der Elektromobilität*. Wissenschaftliche Gesellschaft für Kraftfahrzeuge- und Motorentechnik e.V., 2012.
- [26] Geringer, B., und Hofmann, P. *Skriptum zur Vorlesung: Alternative Antriebe*. Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, TU Wien, Wien, 2012.
- [27] Wallentowitz, H. *Unkonventionelle Fahrzeugantriebe: Vorlesungsumdruck unkonventionelle Kraftfahrzeugantriebe*. Schriftenreihe Automobiltechnik. Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen, 2003.
- [28] Graaf, R. *Simulation hybrider Antriebskonzepte mit Kurzzeitspeicher für Kraftfahrzeuge*. Schriftenreihe Automobiltechnik. Ika, 2002.
- [29] Schäfer, H. *Die Integration elektrischer Achsantriebe in Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. VDI Wissensforum, 2011.
- [30] Stimming, U. *Landolt-Börnstein - Group VIII Advanced Materials and Technologies Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology - Fuel cells*. Springer, 2007.
- [31] Eichlseder, H., und Klell, M. *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*. ISBN: 978-3-8348-2196-6, Vieweg und Teubner, Wiesbaden, 2010.
- [32] Carrette, L., Friedrich, K. A., und Stimming, U. *Fuel Cells: Principles, Types, Fuels and Applications*. ChemPhysChem, 1:162-193.doi:10.1002/1439-7641(20001215)1:4<162::AID-CPHC162 >3.0.CO;2-Z, 2000.
- [33] Blesl, M., Bruchof, D., Hartmann, N., Özdemir, D., Fahl, U., Eltrop, L., und Voß, A. *Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektromobilität*. Universität Stuttgart- Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, 2009.

- [34] Kordesch, K., und Simader, G. *Fuel Cells and Their Applications*. ISBN: 978-3-5272-9777-1, Wiley-VCH, Weinheim, 1996.
- [35] Wiesinger, J. *Abgas-Katalysator*. <http://www.kfztech.de>. [Online; Abgerufen: 28.4.2014], 2013.
- [36] Schuster, A. *Eigenschaften heutiger Batterie- und Wasserstoffspeichersysteme für eine nachhaltige elektrische Mobilität*. 6. Internationale Energiewirtschaftstagung. Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Technische Universität Wien, Wien, 2009.
- [37] Papp, J., Bray, E., Edelstein, D., Fenton, M., Guberman, D., Hedrick, J., Jorgenson, J., Kuck, P., Shedd, K., und Tolcin, A. *Factors that influence the price of Al, Cd, Co, Cu, Fe, Ni, Pb, Rare Earth Elements, and Zn*. Open-File Report 2008-1356, 61 p., U.S. Geological Survey, Virginia, 2008.
- [38] Faulstick, M., Franke, M., Löh, I., und Mocker, M. *Urban Mining - Wertstoffgewinnung aus Abfalldeponien*. ATZ Entwicklungszentrum, Bayrische Abfall- und Deponietage 2010, München, 2010.
- [39] Wang, M., Burnham, A., und Wu, Y. *Greet Software, Greet2 Model*. Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Argonne, 2012.
- [40] Angerer, G., Marscheider-Weidemann, F., Erdmann, L., Scharp, M., Handke, V., und Marwede, M. *Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage*. ISBN: 978-3-8396-0014-6, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2009.
- [41] Meadows, D., Meadows, D., Zahn, E., Milling, P., Anderson, A., Bayar, I., Murthy, N., Randers, J., und Seeger, J. *Die Grenzen des Wachstums, Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*. ISBN: 978-3-4210-2633-0, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1972.
- [42] Hannover, B. *Trends des Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen: Endbericht ; Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi)*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2008.

- [43] Lucas, R., Bleischwitz, R., Krause, M., und Stürmer, M. *Kupfereffizienz - unerschlossene Potenziale, neue Perspektiven*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal, 2008.
- [44] Rothe, P. *Schätze der Erde- Die faszinierende Welt der Rohstoffe*. Primus Verlag, Darmstadt, 2010.
- [45] N.N. *Mineral commodity summaries 2004:US Geological Survey*. U.S. Geological Survey, Virginia, 2004.
- [46] N.N. *Mineral commodity summaries 2006:US Geological Survey*. U.S. Geological Survey, Virginia, 2006.
- [47] N.N. *Mineral commodity summaries 2008:US Geological Survey*. U.S. Geological Survey, Virginia, 2008.
- [48] N.N. *Mineral commodity summaries 2012:US Geological Survey*. U.S. Geological Survey, Virginia, 2012.
- [49] N.N. *Mineral commodity summaries 2003:US Geological Survey*. U.S. Geological Survey, Virginia, 2003.
- [50] N.N. *Mineral commodity summaries 2005:US Geological Survey*. U.S. Geological Survey, Virginia, 2005.
- [51] N.N. *Mineral commodity summaries 2007:US Geological Survey*. U.S. Geological Survey, Virginia, 2007.
- [52] N.N. *Mineral commodity summaries 2011:US Geological Survey*. U.S. Geological Survey, Virginia, 2011.
- [53] Erdmann, L., Behrendt, S., und Feil, M. *Kritische Rostoffe für Deutschland- Anhang zum Abschlussbericht*. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), Berlin, 2011.
- [54] Catalog Sources World Development Indicators. *GDP growth (annual %)*. <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG>. [Online; Abgerufen: 30.1.2013], 2013.
- [55] Rottmair, C. *Dissertation: Einfluss der thermischen Prozessführung auf die Eigenschaften von Graphitformteilen, hergestellt durch Pulverspritzguss von Mesophasen-Kohlenstoff*. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Technische Fakultät, Erlangen, 2008.

- [56] N.N. *Mineral commodity summaries 2010:US Geological Survey*. U.S. Geological Survey, Virginia, 2010.
- [57] N.N. *Graphite*. Minerals Education Coalition, Englewood, 2013.
- [58] Quadbeck-Seeger, H. *Die Welt der Elemente - die Elemente der Welt*. ISBN: 978-3-527-31789-9, Wiley-VCH-Verlag, 2007.
- [59] Naumov, A., und Grinberg, E., 2009. "Several peculiarities in the analysis of the markets of rare and scattered metals after 2004". *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, **50**(1), pp. 61–68, 2009.
- [60] Weber, L., Zsak, G., Reichl, C., und Schatz, M. *World Mining Data 2012*. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Wien, 2012.
- [61] Binder, H. *Lexikon der metallischen Elemente: Das Periodensystem in Fakten, Zahlen und Daten*. ISBN: 978-3-777-60736-8, Hirzel, Stuttgart, 1999.
- [62] Lutz, F. *Die zukünftige Verfügbarkeit knapper, strategisch wichtiger Metalle - Risiken und Herausforderungen*. KIT scientific reports. Denkwerk Zukunft - Stiftung kulturelle Erneuerung, Bonn, 2010.
- [63] Luidold, S., und et al. *Kritische Rohstoffe für die Hochtechnologieanwendung in Österreich- Zwischenstand und bisherige Ergebnisse der Studie*. Department Metallurgie, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2013.
- [64] Ehrenberger, S., Norra, S., und Stüben, D. *Seminarbeitrag Platingruppenelemente*. Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2004.
- [65] United Nations Department of Economic and Social Affairs. *World Population Prospects: The 2010 Revision*. United Nations, New York, 2011.
- [66] N.N. *Passenger cars (per 1,000 people)*. International Road Federation, World Road Statistics and data files. The World Bank, Washington DC., 2012.
- [67] Surges, H., Moritz, A., und Bratzl, S. *Die Zukunft der Automobilzulieferindustrie: Trends - Perspektiven - Strategie*. Management Engineers und Fachhochschule der Wirtschaft/ Center of Automotive, Düsseldorf, 2010.
- [68] N.N. *World Motor Vehicle Production by Country and type (2006-2007)*. OICA International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, Paris, 2008.

- [69] N.N. *World Motor Vehicle Production by Country and type (2007-2008)*. OICA International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, Paris, 2009.
- [70] N.N. *World Motor Vehicle Production by Country and type (2008-2009)*. OICA International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, Paris, 2010.
- [71] N.N. *World Motor Vehicle Production by Country and type (2009-2010)*. OICA International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, Paris, 2011.
- [72] N.N. *World Motor Vehicle Production by Country and type (2010-2011)*. OICA International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, Paris, 2012.
- [73] Finkenzeller, K., und Lamparter, D. *Alle Bänder stehen still*. <http://pdf.zeit.de/2012/45/Europa-Autowerke-Ford.pdf>. [Online; Abgerufen: 29.1.2013], 2012.
- [74] N.N. *The Role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles - A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis*. McKinsey & Company, 2010.
- [75] Spiegel Online. *Der VW Lupo 3L*. <http://www.spiegel.de/auto/fahrkultur/60-deutsche-autos-der-vw-lupo-3l-a-626049.html>. [Online; Abgerufen: 27.2.2013], 2009.
- [76] Aral Aktiengesellschaft- Marktforschung. *Aral Studie- Trends beim Autokauf 2011*. Aral Aktiengesellschaft- Marktforschung, Bochum, 2011.
- [77] Eckstein, L., Ernst, C., Faßbender, S., und Gnörich, B. *Mobilitätsbedürfniss der kommenden Kundengeneration und Auswirkungen auf den Antriebsstrang*. Fortschritts-Bericht, 33. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2012.
- [78] Faßbender, S., Eckstein, L., Ickert, L., Urban, P., und Hören, B. *A Vehicle for the Requirements of Generation Z- Results of a Survey among 1,200 Young People*. 20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2011, Aachen, 2011.
- [79] Sommer, K. *Continental-Mobilitätsstudien 2011*. Continental: Marktforschung Automotive, Hannover, 2011.

- [80] Daimler AG. *Brennstoffzelle*. <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1228969-49-1401156-1-0-0-1401206-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0.html>. [Online; Abgerufen: 2.10.2013], 2013.
- [81] Weber, L. *Der österreichische Rohstoffplan - Archiv für Lagerstättenforschung Band 26*. Geologische Bundesanstalt, 2012.
- [82] Erdmann, L., Behrendt, S., und Feil, M. *Kritische Rohstoffe für Deutschland*. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), Berlin, 2011.
- [83] NEDO New Energy and Industrial Technology Development Organization. *Trend Report of Development in Materials for Substitution of Scarce Materials*. NEDO Report.No 08007835-0 08007838-0, Tokyo, 2009.
- [84] Pfleger, P., Lichtblau, K., Bardt, H., und Reller, A. *Rohstoffsituation Bayern: Keine Zukunft ohne Rostoffe. Strategien und Handlungsoptionen*. VBW Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft, München, 2009.
- [85] Reenberger, G. *Zukünftige Nutzung der Deponie als Ressourcenquelle*. In: *Flamme, Gallenkemper, Gellenbeck, Bidlingmaier, Kranert, Nelles, Stegmann*. Tagungsband der 11. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münster, 2009.
- [86] Richers, U. *Abfallverbrennung in Deutschland - Entwicklungen und Kapazitäten*. KIT scientific reports. KIT Scientific Publishing, 2010.
- [87] Klein-Möllhoff, P., Benad, H., Beilard, F., Esmail, M., und Knöll, M. *Die Batterie als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität der Zukunft Herausforderungen - Potenziale - Ausblick*. Carsten Rennhak und Gerd Nufer, Reutlinger Diskussionsbeiträge zu Marketing und Management, Reutlingen, 2012.
- [88] Klein-Möllhoff, P., Benad, H., Beilard, F., Esmail, M., und Knöll, M. *Studie*. Roland Berger Strategy Consultants, 2009.
- [89] Kevin Bullis, MIT Technology Review. *How Tesla Is Driving Electric Car Innovation*. <http://www.technologyreview.com/news/516961/how-tesla-is-driving-electric-car-innovation/>. [Online; Abgerufen: 12.5.2014], 2013.
- [90] Korkmaz, F. *Hydrospeicher als Energiespeicher*. ISBN: 978-3-540-11109-2, Springer London, London, 1982.

- [91] Böske, J., und Heuterkes, M. *Absolute und relative Knappheit: der Fall Hoteling gegen Adelman*. Volkswirtschaftliche Diskussionsbeiträge / Westfälische Wilhelms-Universität Münster. Institut für Finanzwissenschaften, Münster, 2005.
- [92] N.N. *Mineral commodity summaries 2002:US Geological Survey*. U.S. Geological Survey, Virginia, 2002.
- [93] N.N. *Mineral commodity summaries 2001:US Geological Survey*. U.S. Geological Survey, Virginia, 2001.
- [94] Shedd, K. *U.S. Geological Survey: 2010 Mineral Yearbook: Cobalt [Advance Release]*. U.S. Geological Survey, 2012.
- [95] N.N. *Basisinformationen zu Vermögensanlage mit Alternativen Investments*. Deutsche Bank, Frankfurt, 2004.
- [96] Eurostat. *Euro-Dollar Wechselkurs*. [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui-setupModifyTableLayout.do](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/setupModifyTableLayout.do). [Online; Abgerufen: 2.5.2013], 2013.

Kapitel 10

Anhang

Im *Kapitel 6* wird das Angebotsmodell besprochen, das unabhängig von den Kundenwünschen, mögliche Absatzmodelle vorgibt. Die detaillierten Ergebnisse der Berechnungen der Herstellkosten der einzelnen Antriebskonzepte in den definierten Welten, sowie unter Berücksichtigung des Einflusses durch die Rohstoffpreise, werden in den nachstehenden *Abbildungen 10.1-10.10* dargestellt. Zusätzlich werden auch die Auswirkungen auf die Batteriekosten in €/kWh und auf die Brennstoffzellen-Stackkosten in €/kW angegeben.

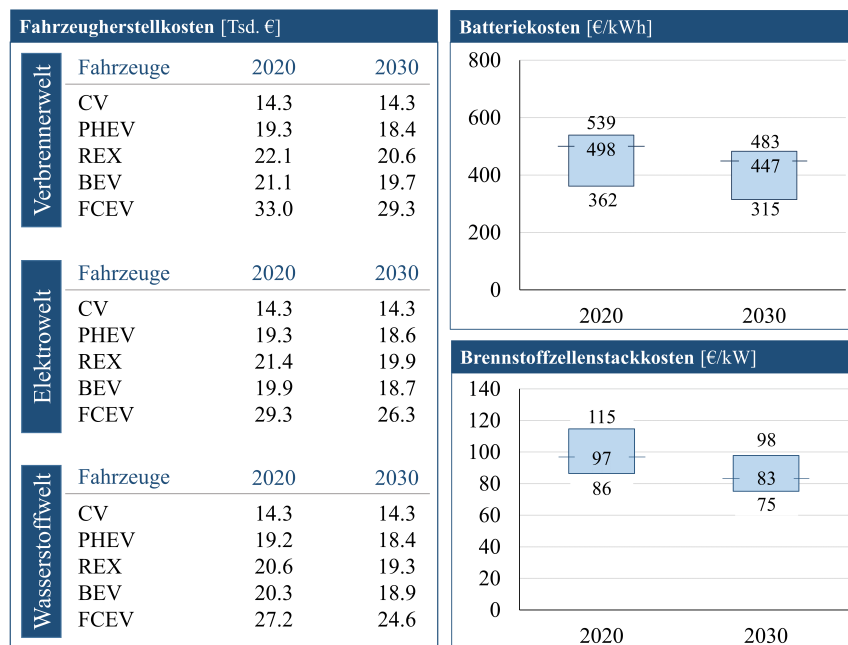


Abbildung 10.1: Szenario I: Konstante Rohstoffpreisentwicklung

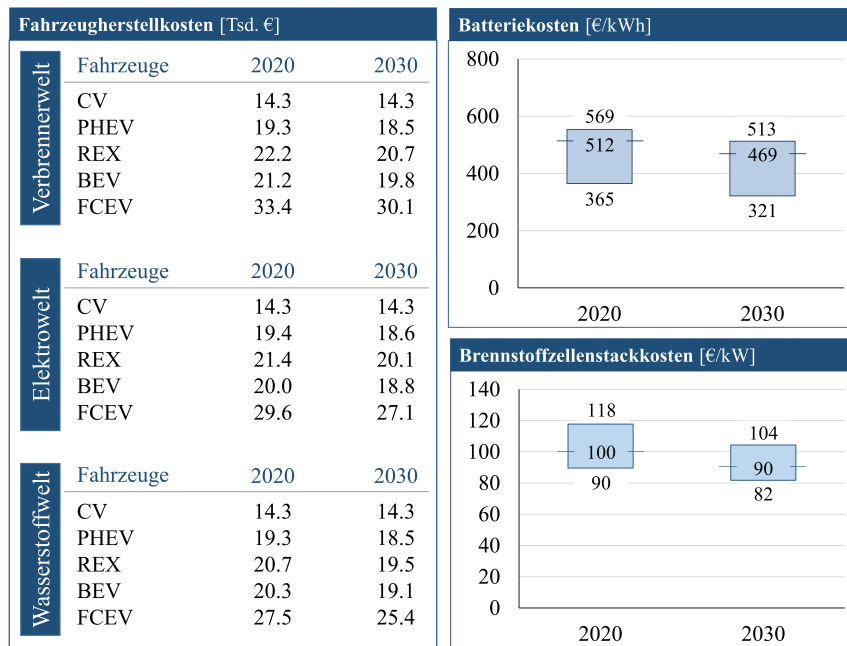


Abbildung 10.2: Szenario II: Anstieg der Rohstoffpreise um 1 % pro Jahr

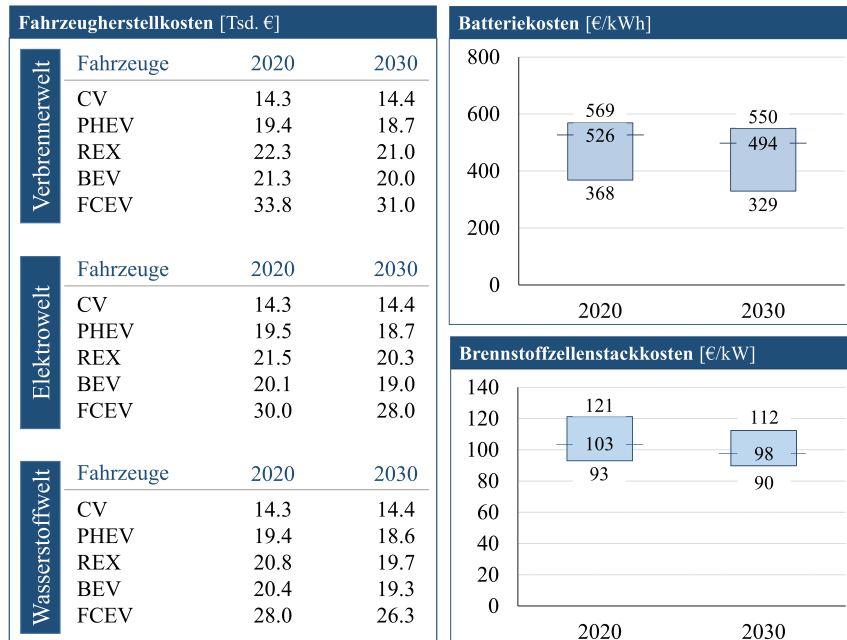


Abbildung 10.3: Szenario III: Anstieg der Rohstoffpreise um 2 % pro Jahr

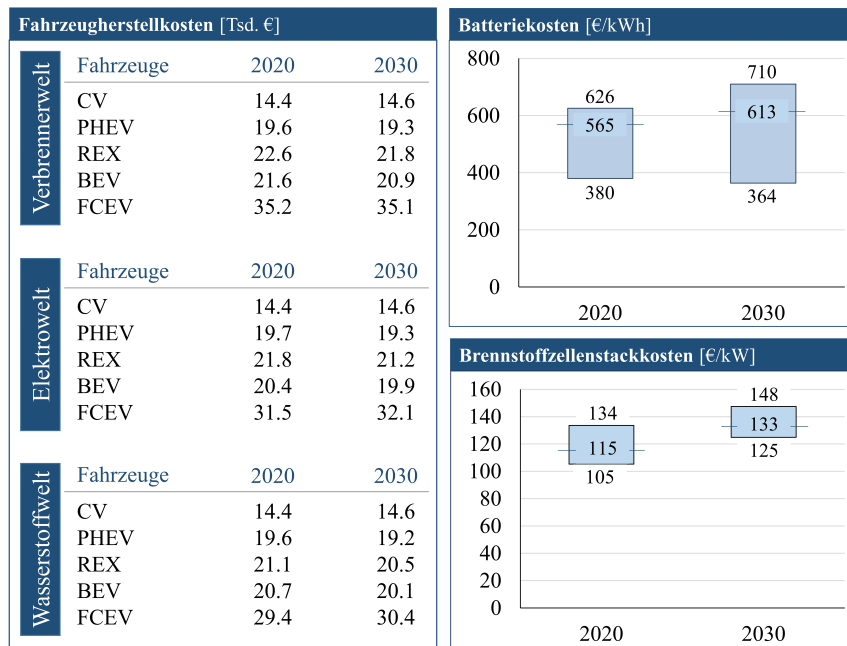


Abbildung 10.4: Szenario IV: Anstieg der Rohstoffpreise um 5 % pro Jahr

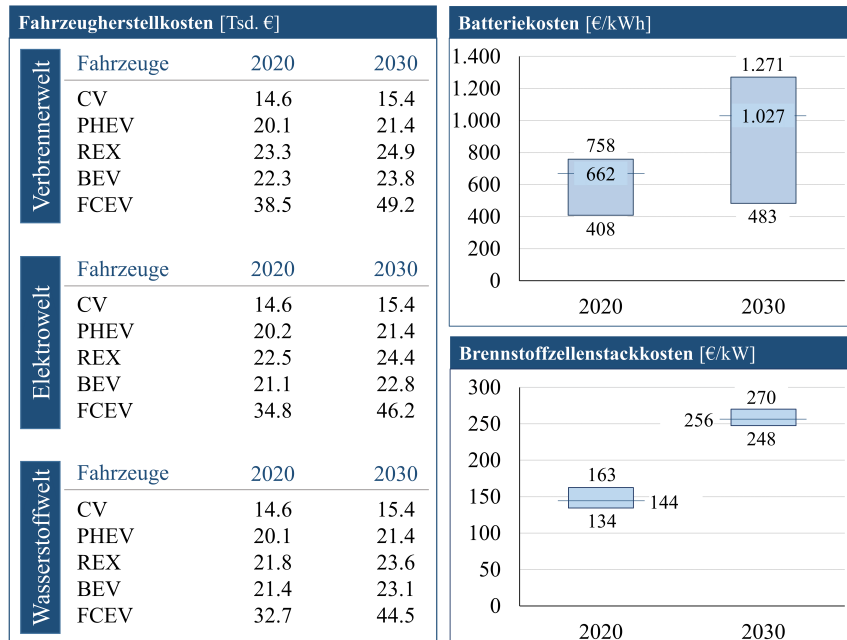


Abbildung 10.5: Szenario V: Anstieg der Rohstoffpreise um 10 % pro Jahr

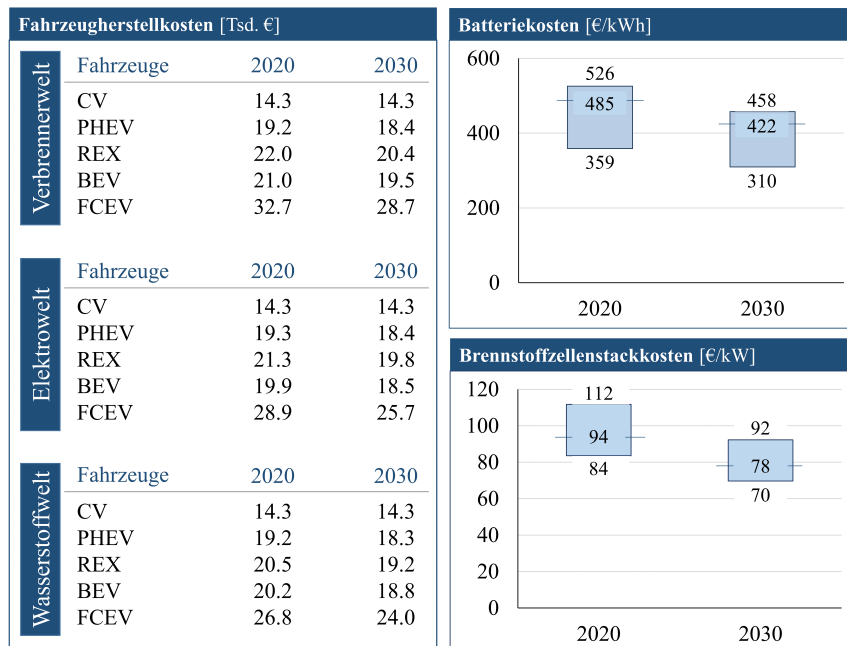


Abbildung 10.6: Szenario VI: Absinken der Rohstoffpreise um 1 % pro Jahr

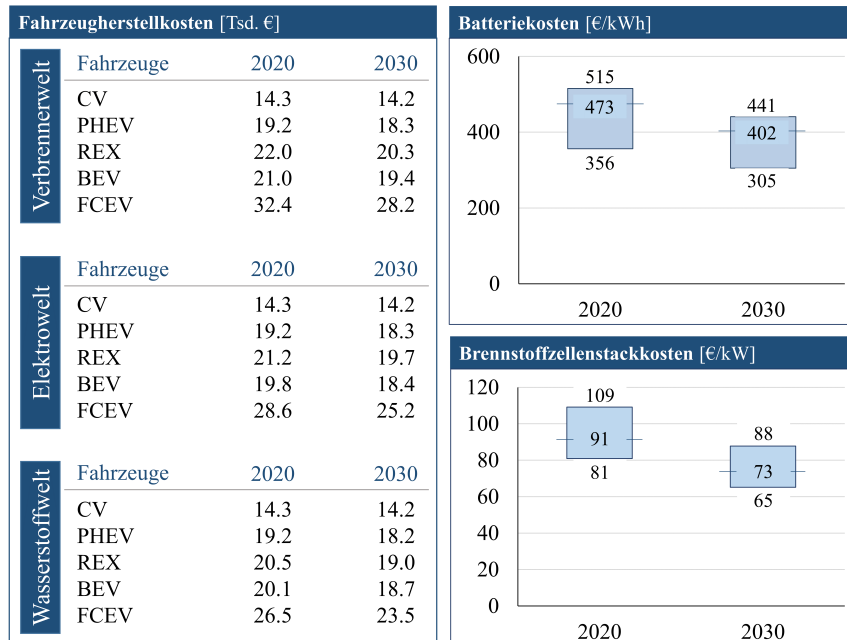


Abbildung 10.7: Szenario VII: Absinken der Rohstoffpreise um 2 % pro Jahr

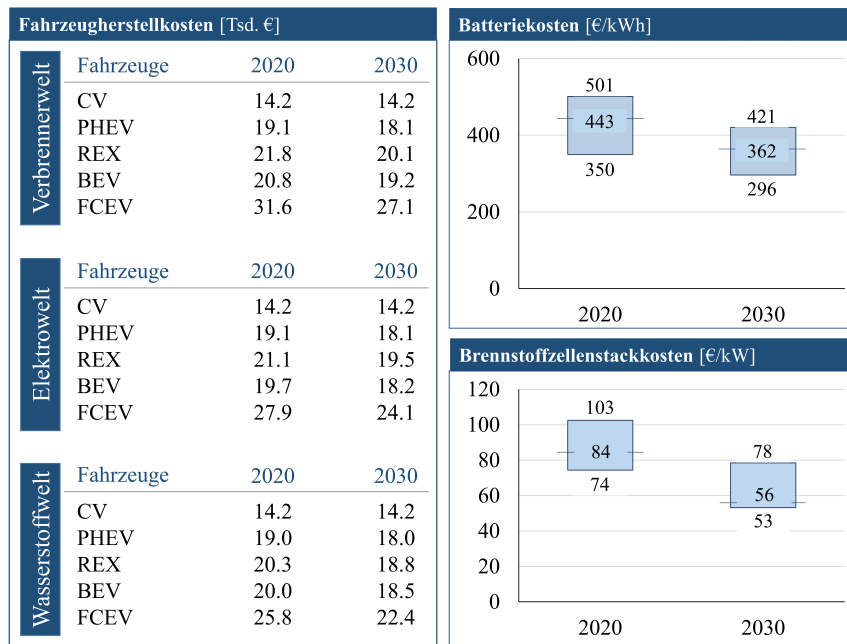


Abbildung 10.8: Szenario VIII: Absinken der Rohstoffpreise um 5 % pro Jahr

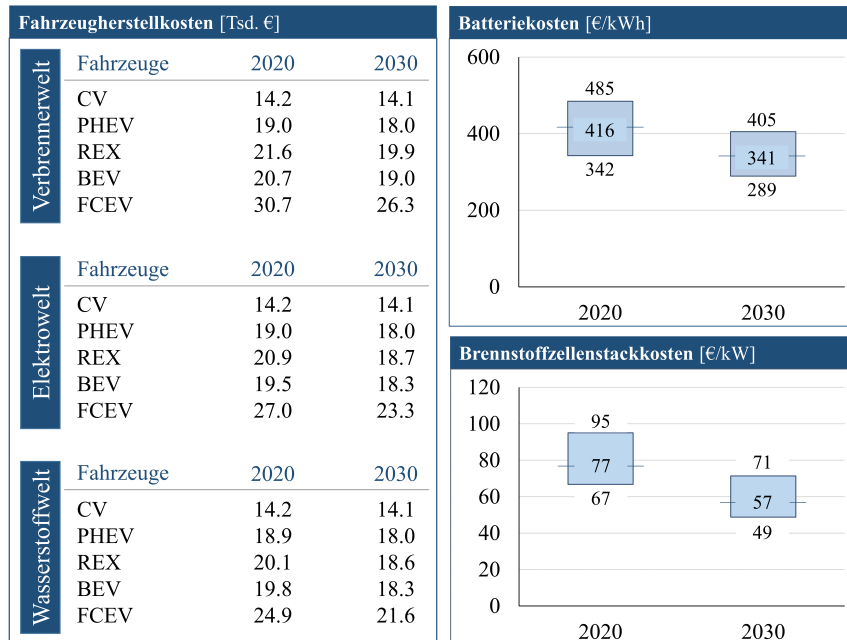


Abbildung 10.9: Szenario IX: Absinken der Rohstoffpreise um 10 % pro Jahr

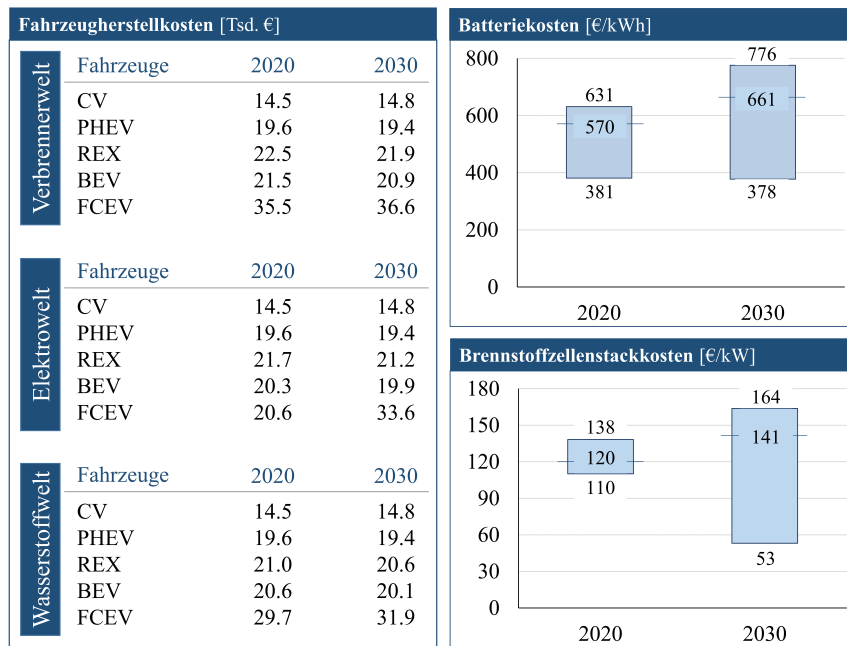


Abbildung 10.10: Szenario X: Lineare Entwicklung der Rohstoffpreise

Das im *Kapitel 5* besprochene Nachfragemodell ermittelt Absatzzahlen der PKW-Antriebskonzepte unter Berücksichtigung der Kunden bzw. deren Anforderungen. Die detaillierten Ergebnisse, in Abhängigkeit zu den Rohstoffpreisen, werden in den *Abbildungen 10.11-10.20* dargestellt.

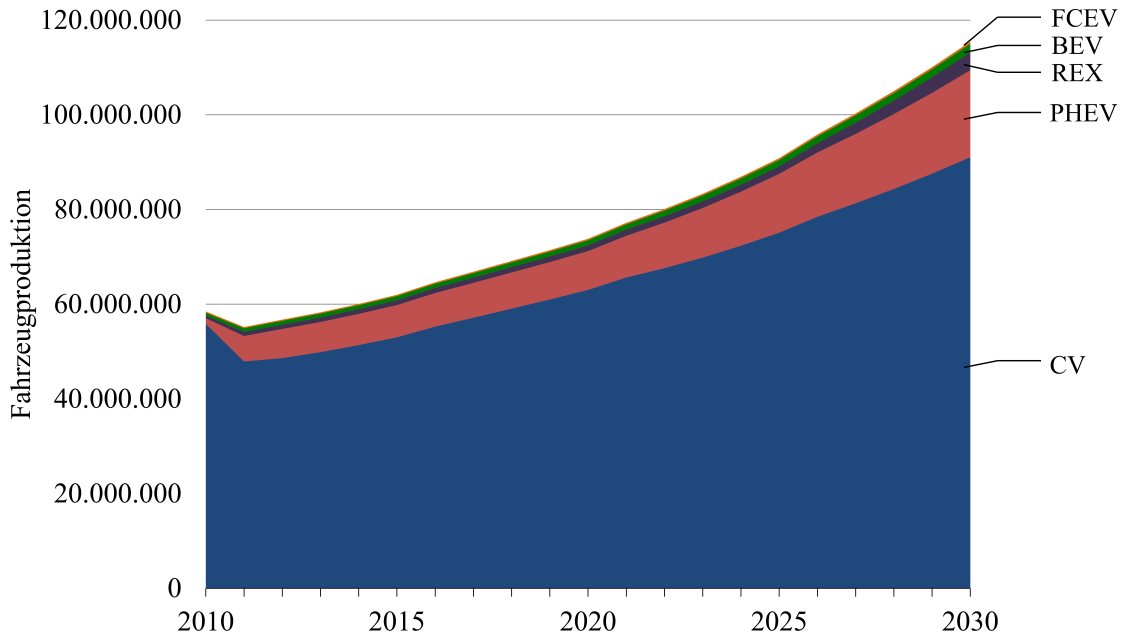


Abbildung 10.11: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario I)

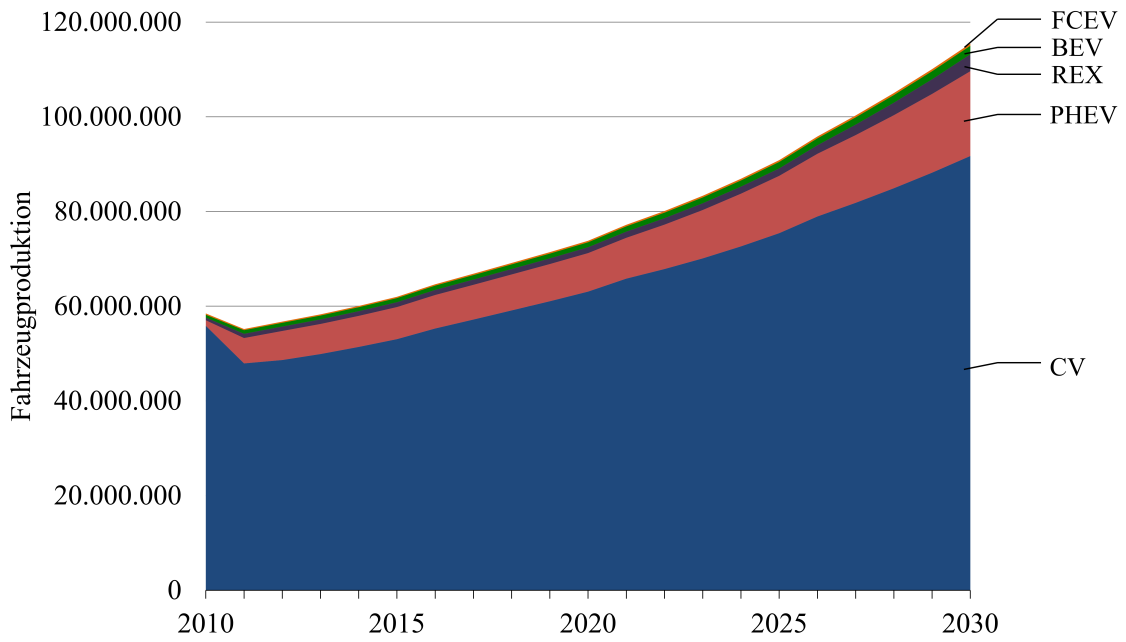


Abbildung 10.12: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario II)

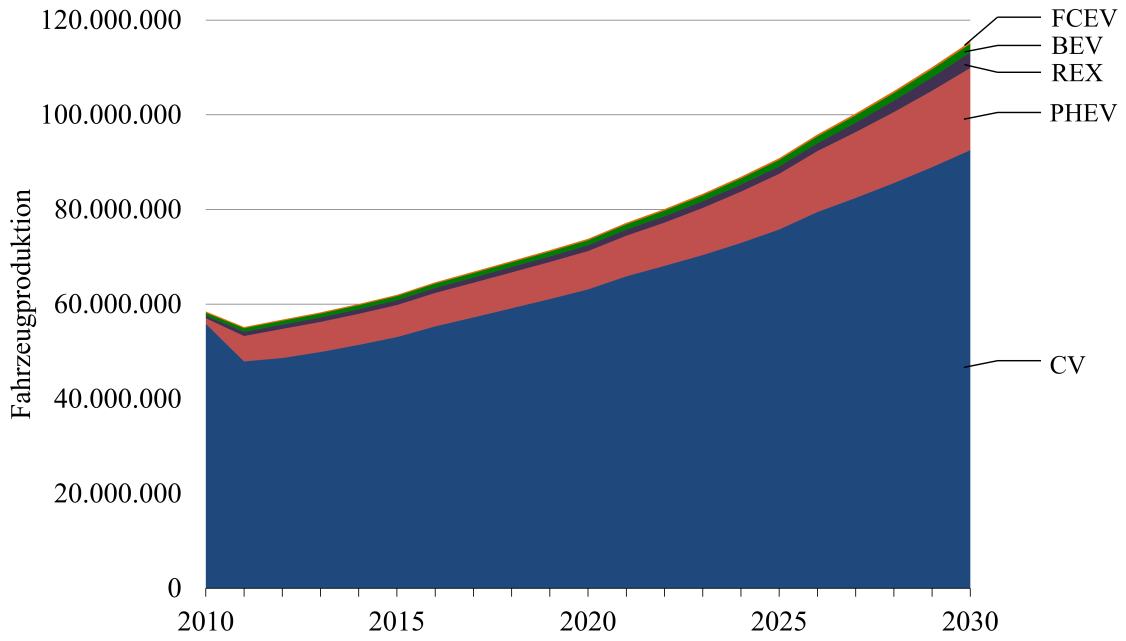


Abbildung 10.13: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario III)

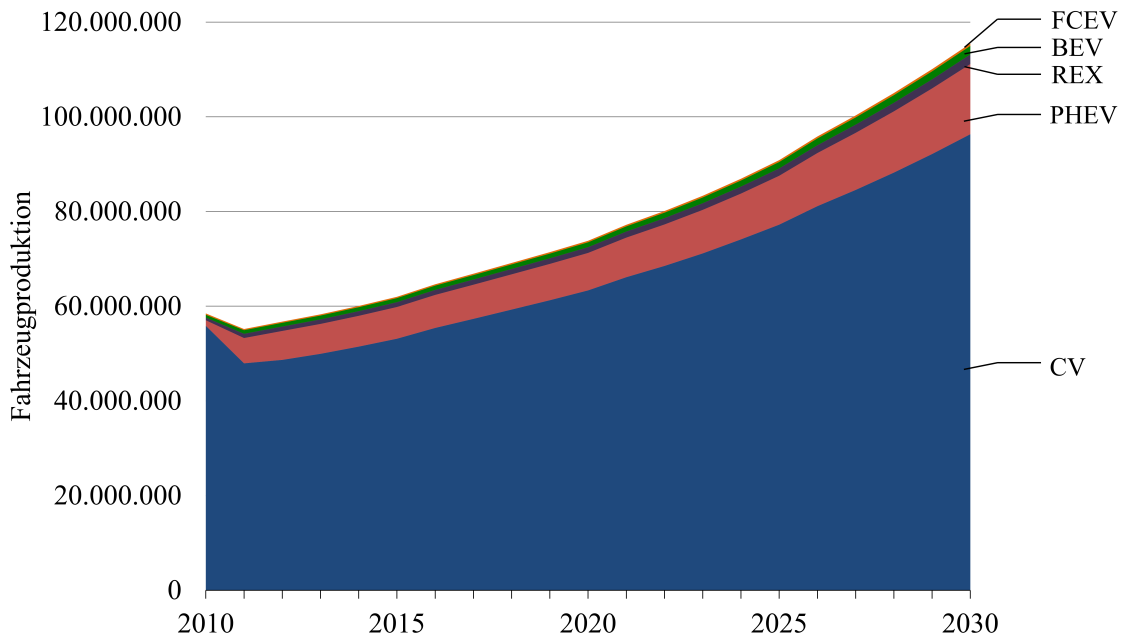


Abbildung 10.14: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario IV)

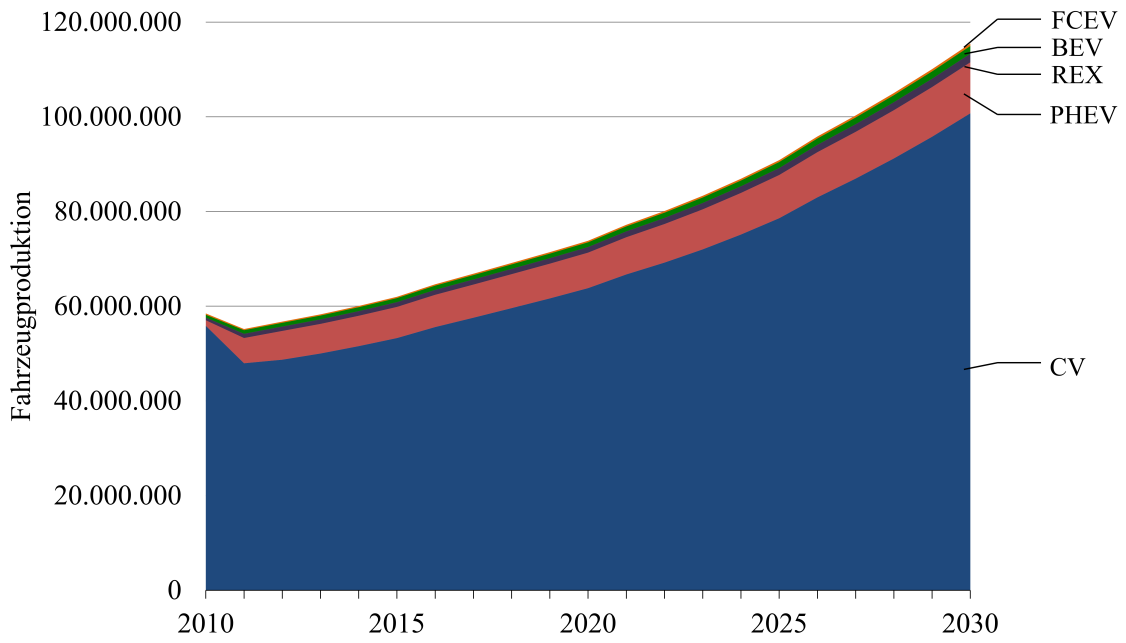


Abbildung 10.15: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario V)

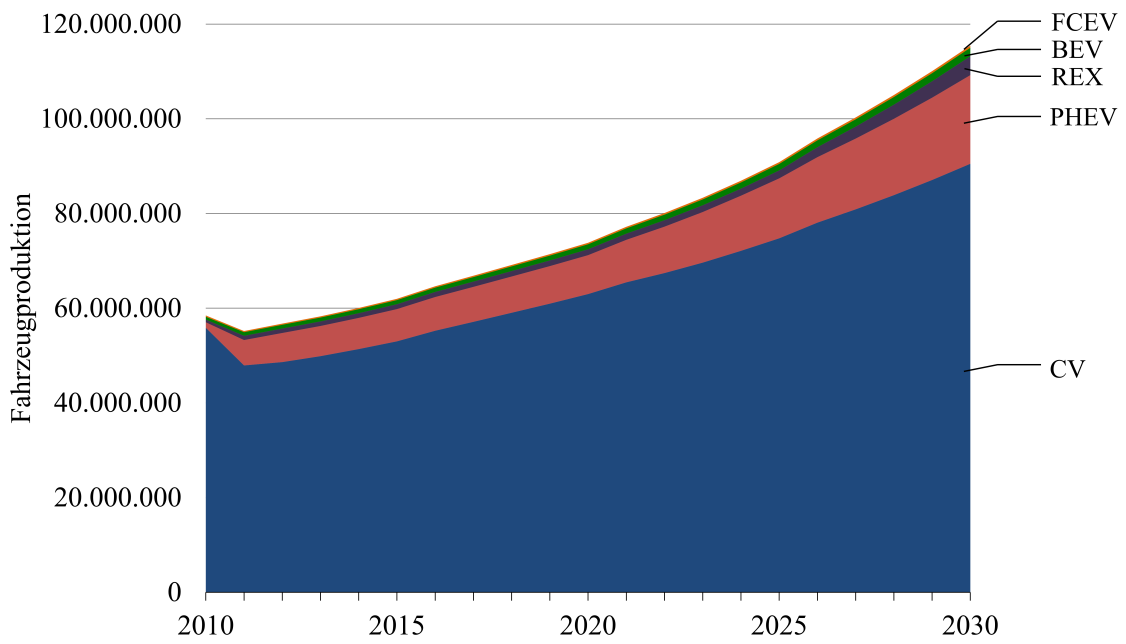


Abbildung 10.16: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario VI)

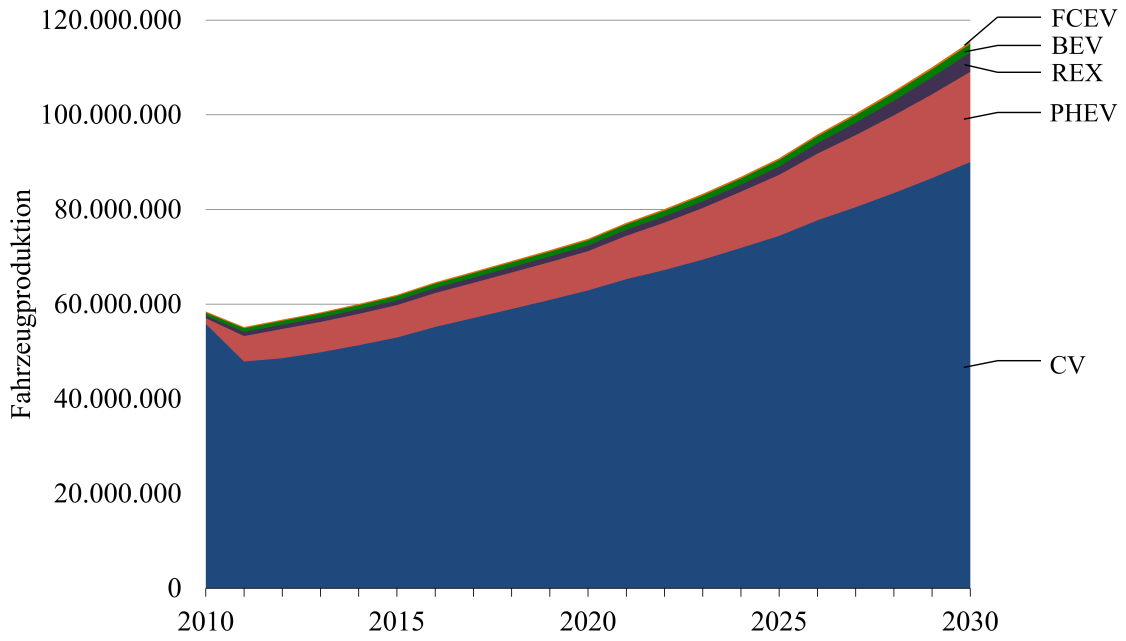


Abbildung 10.17: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario VII)

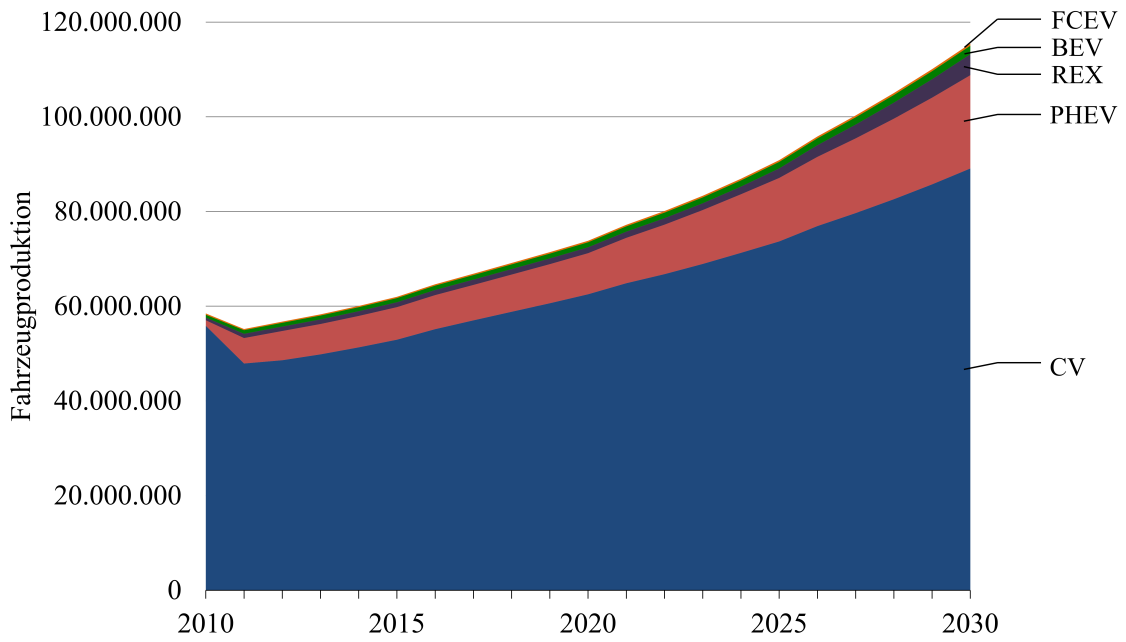


Abbildung 10.18: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario VIII)

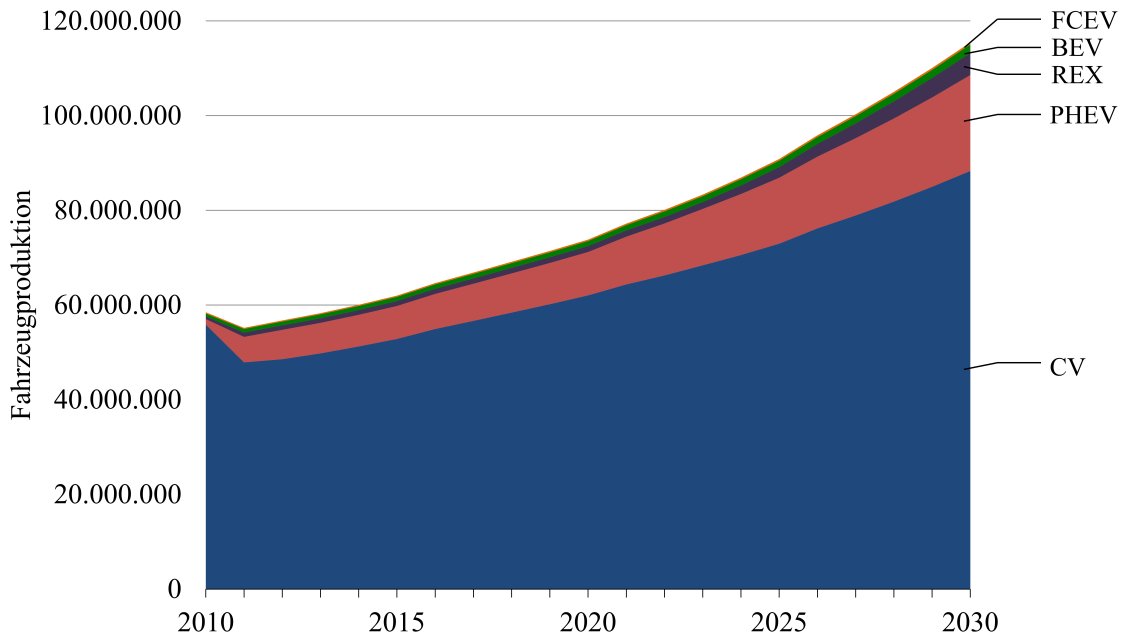


Abbildung 10.19: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario IX)

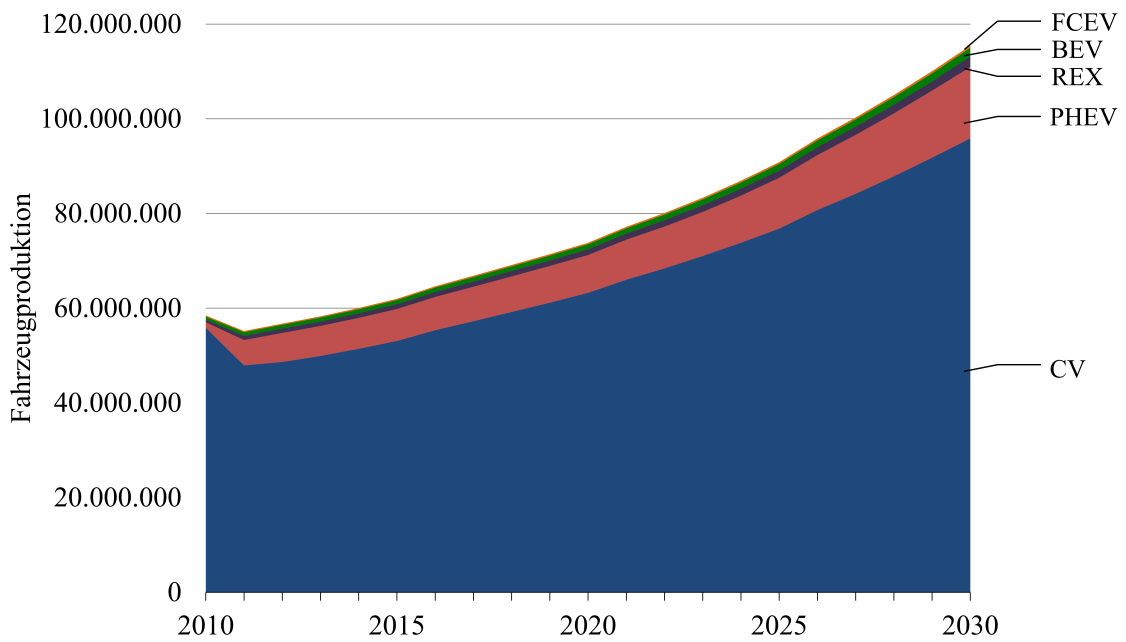


Abbildung 10.20: Produktionszahlen der Antriebskonzepte im Nachfragemodell (Szenario X)

Zur Berechnung der Rohstoffpreise in den *Tabellen 10.3-10.11* in Euro wurden die in *Tabelle 10.1* Wechselkurse für die verschiedenen Jahre herangezogen.

Tabelle 10.1: US-Dollar/Euro-Wechselkurs im Jahresdurchschnitt von 2000-2010 [96], [Eigene Berechnungen]

| | EUR/USD | USD/EUR |
|------|----------------|----------------|
| 2000 | 0,9236 | 1,0827 |
| 2001 | 0,8956 | 1,1166 |
| 2002 | 0,9456 | 1,0575 |
| 2003 | 1,1312 | 0,8840 |
| 2004 | 1,2439 | 0,8039 |
| 2005 | 1,2441 | 0,8038 |
| 2006 | 1,2556 | 0,7964 |
| 2007 | 1,3705 | 0,7297 |
| 2008 | 1,4708 | 0,6799 |
| 2009 | 1,3948 | 0,7169 |
| 2010 | 1,3257 | 0,7543 |

In *Tabelle 10.2* wird die in *Abschnitt 4.1.3* zur Berechnung der gesamten Absatzzahlen von Fahrzeugen benötigte, Entwicklung der Bevölkerungsdichte angeführt.

Tabelle 10.2: Bevölkerungsentwicklung (2010-2030) [65]

| | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Welt | 7.084.322 | 7.166.615 | 7.247.968 | 7.328.309 | 7.407.495 | 7.489.178 | 7.569.657 | 7.648.504 | 7.725.230 | 7.799.672 |
| Höher entwickelte Länder | 1.295.081 | 1.300.501 | 1.305.470 | 1.310.270 | 1.314.998 | 1.320.451 | 1.325.809 | 1.330.872 | 1.335.358 | 1.339.173 |
| Weniger entwickelte Länder | 5.789.241 | 5.866.114 | 5.942.498 | 6.018.039 | 6.092.497 | 6.168.727 | 6.243.848 | 6.317.631 | 6.389.872 | 6.460.499 |
| Wenig entwickelte Länder | 854.839 | 874.352 | 894.266 | 914.450 | 934.805 | 955.637 | 976.638 | 997.781 | 1.019.045 | 1.040.416 |
| Wenig entwickelte Länder, ohne wenigst entwickelte Länder | 4.934.402 | 4.991.761 | 5.048.232 | 5.103.588 | 5.157.692 | 5.213.089 | 5.267.210 | 5.319.850 | 5.370.827 | 5.420.083 |
| Wenig entwickelte Länder, ohne China | 4.390.439 | 4.460.067 | 4.529.670 | 4.599.043 | 4.668.019 | 4.738.372 | 4.808.257 | 4.877.499 | 4.945.932 | 5.013.470 |
| | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 |
| Welt | 7.876.046 | 7.950.413 | 8.023.016 | 8.094.219 | 8.164.264 | 8.237.252 | 8.308.821 | 8.379.131 | 8.448.426 | 8.516.786 |
| Höher entwickelte Länder | 1.343.333 | 1.346.991 | 1.350.366 | 1.353.745 | 1.357.287 | 1.361.756 | 1.366.255 | 1.370.693 | 1.374.898 | 1.378.762 |
| Weniger entwickelte Länder | 6.532.713 | 6.603.421 | 6.672.649 | 6.740.474 | 6.806.977 | 6.875.497 | 6.942.565 | 7.008.439 | 7.073.528 | 7.138.024 |
| Wenig entwickelte Länder | 1.062.246 | 1.084.157 | 1.106.139 | 1.128.191 | 1.150.317 | 1.172.930 | 1.195.611 | 1.218.346 | 1.241.126 | 1.263.946 |
| Wenig entwickelte Länder, ohne wenigst entwickelte Länder | 5.470.467 | 5.519.264 | 5.566.511 | 5.612.282 | 5.656.660 | 5.702.567 | 5.746.955 | 5.790.093 | 5.832.402 | 5.874.078 |
| Wenig entwickelte Länder, ohne China | 5.082.157 | 5.149.974 | 5.216.885 | 5.282.882 | 5.347.986 | 5.414.423 | 5.479.932 | 5.544.616 | 5.608.645 | 5.672.097 |

In den Tabellen *Tabellen 10.3-10.11* werden die für die Rohstoffanalyse (siehe *Abschnitt 3.4*) notwendigen Daten angeführt.

Tabelle 10.3: Eingangsdaten für den Rohstoff Kobalt von 2000-2010 [5], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [92], [93], [Eigene Berechnungen]

| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| Produktion | 33.300 | 36.600 | 47.600 | 48.400 | 52.400 | 57.900 | 67.500 | 65.600 | 75.900 | 72.300 | 89.450 | [metr.t] |
| HHI | 1472 | 1455 | 1620 | 1620 | 1721 | 2038 | 2209 | 2022 | 2123 | 2704 | 3021 | [] |
| Preis | 15,16 | 10,55 | 6,91 | 10,60 | 23,93 | 15,96 | 17,22 | 30,55 | 39,01 | 17,86 | 21,00 | [\$/lb] |
| Reserven | 3.165 | 6.690 | 6.995 | 6.945 | 6.835 | 6.921 | 6.954 | 7.104 | 6.604 | 7.302 | 7.530 | [t.metr.t] |
| Ressourcen | 11.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | [t.metr.t] |
| Recyclingrate | 33 | 29 | 31 | 28 | 27 | 25 | 22 | 22 | 20 | 24 | 24 | [%] |
| DR Kongo | 7.000 | 4.700 | 12.500 | 12.000 | 16.000 | 22.000 | 28.000 | 25.300 | 31.000 | 35.500 | 47.400 | [metr.t] |
| China | - | - | - | - | - | 1.300 | 2.300 | 2.000 | 6.000 | 6.000 | 6.500 | [metr.t] |
| Russland | 3.600 | 3.800 | 4.600 | 4.800 | 4.700 | 5.000 | 5.100 | 6.300 | 6.200 | 6.100 | 6.200 | [metr.t] |
| Sambia | 4.600 | 8.000 | 10.000 | 11.300 | 10.000 | 9.300 | 8.000 | 7.600 | 6.900 | 5.000 | 5.700 | [metr.t] |
| Kanada | 5.300 | 5.300 | 5.100 | 4.300 | 5.200 | 5.500 | 7.000 | 8.300 | 8.600 | 4.100 | 4.600 | [metr.t] |
| Australien | 5.600 | 6.200 | 6.700 | 6.900 | 6.700 | 6.000 | 7.400 | 5.900 | 6.100 | 4.600 | 3.850 | [metr.t] |
| Kuba | 2.400 | 3.400 | 3.400 | 3.000 | 3.600 | 3.600 | 3.800 | 3.800 | 3.200 | 3.500 | 3.600 | [metr.t] |
| Marokko | - | - | 1.300 | 1.300 | 1.600 | 1.600 | 1.500 | 1.500 | 1.700 | 1.600 | 2.200 | [metr.t] |
| Brasilien | - | - | 1.200 | 1.300 | 1.400 | 1.200 | 1.200 | 1.400 | 1.200 | 1.200 | 1.600 | [metr.t] |
| Neu Kaledonien | 1.100 | 1.400 | 1.400 | 1.400 | 1.400 | 1.200 | 1.900 | 1.600 | 1.600 | 1.000 | 1.000 | [metr.t] |
| Andere Länder | 3.700 | 3.800 | 1.400 | 2.100 | 1.800 | 1.200 | 1.300 | 1.900 | 3.400 | 3.700 | 6.800 | [metr.t] |

Tabelle 10.4: Eingangsdaten für den Rohstoff Kupfer von 2000-2010 [5], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [92], [93], [Eigene Berechnungen]

| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Produktion | 12.984 | 13.685 | 13.639 | 13.574 | 14.598 | 14.999 | 15.124 | 15.428 | 15.427 | 15.860 | 15.938 |
| HHI | 1792 | 1759 | 1691 | 1853 | 1919 | 1822 | 1862 | 1852 | 1787 | 1440 | 1438 |
| Preis | 82,2 | 71,6 | 700,7 | 80,7 | 130,0 | 166,8 | 304,9 | 322,8 | 315,0 | 233,6 | 341,7 |
| Reserven | 339 | 489 | 474 | 467 | 467 | 482 | 487 | 550 | 542 | 635 | 687 |
| Ressourcen | 2.300 | 2.940 | 2.940 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 | 3.000 |
| Recyclingrate | 33 | 32 | 31 | 30 | 30 | 31 | 32 | 31 | 35 | 35 | 35 |
| Chile | 4.600 | 4.740 | 4.580 | 4.900 | 5.410 | 5.320 | 5.360 | 5.560 | 5.330 | 5.390 | 5.420 |
| Peru | 554 | 722 | 843 | 831 | 1.040 | 1.010 | 1.049 | 1.190 | 1.270 | 1.275 | 1.250 |
| China | 590 | 590 | 585 | 610 | 620 | 755 | 890 | 946 | 950 | 995 | 1.190 |
| Vereinigte Staaten | 1.440 | 1.340 | 1.140 | 1.120 | 1.160 | 1.140 | 1.220 | 1.170 | 1.310 | 1.180 | 1.110 |
| Indonesien | 1.012 | 1.050 | 1.160 | 979 | 840 | 1.070 | 816 | 797 | 651 | 996 | 872 |
| Russland | 570 | 620 | 695 | 675 | 675 | 700 | 725 | 740 | 750 | 725 | 703 |
| Sambia | - | - | - | 330 | 427 | 436 | 476 | 520 | 546 | 697 | 690 |
| Kanada | 634 | 633 | 600 | 558 | 564 | 567 | 607 | 589 | 607 | 491 | 525 |
| Polen | 456 | 474 | 503 | 495 | 531 | 523 | 512 | 452 | 430 | 439 | 425 |
| Andere Länder | 2.515 | 2.647 | 2.650 | 2.246 | 2.477 | 2.551 | 2.630 | 2.594 | 2.697 | 2.818 | 2.883 |

Tabelle 10.5: Eingangsdaten für den Rohstoff Lithium von 2000-2010 [5], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [92], [93], [Eigene Berechnungen]

| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| Produktion | 13.920 | 15.220 | 14.167 | 15.110 | 20.229 | 20.569 | 23.489 | 25.777 | 25.390 | 18.750 | 28.100 | [metr.t] |
| HHI | 1959 | 2677 | 2302 | 2768 | 2337 | 2365 | 2170 | 2859 | 2698 | 2571 | 2804 | □ |
| Preis | | | | | | | | | | | | [\$/lb] |
| Reserven | 3.391 | 4.131 | 4.131 | 4.131 | 4.131 | 4.131 | 4.131 | 4.131 | 9.851 | 12.565 | 12.917 | [t.metr.t] |
| Ressourcen | 12.760 | 13.760 | 13.760 | 13.760 | 13.760 | 13.760 | 13.760 | 25.500 | 13.760 | 33.000 | 34.000 | [t.metr.t] |
| Recyclingrate | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | [%] |
| Chile | 5.300 | 6.800 | 5.920 | 6.580 | 7.990 | 8.270 | 8.200 | 11.100 | 10.600 | 5.620 | 10.510 | [metr.t] |
| Australien | 2.400 | 2.000 | 3.140 | 3.450 | 3.930 | 3.770 | 5.500 | 6.910 | 6.280 | 6.280 | 9.260 | [metr.t] |
| China | 2.400 | 2.400 | 2.400 | 2.500 | 2.630 | 2.820 | 2.820 | 3.010 | 3.290 | 3.760 | 3.950 | [metr.t] |
| Argentinien | 200 | 200 | 946 | 960 | 1.970 | 1.980 | 2.900 | 3.000 | 3.170 | 2.220 | 2.950 | [metr.t] |
| Portugal | 140 | 200 | 190 | 190 | 320 | 320 | 320 | 570 | 700 | - | 800 | [metr.t] |
| Simbabwe | 740 | 700 | 640 | 480 | 240 | 260 | 600 | 300 | 500 | 400 | 470 | [metr.t] |
| Brasilien | 30 | 220 | 224 | 240 | 242 | 242 | 242 | 180 | 160 | 160 | 160 | [metr.t] |
| Kanada | 710 | 700 | 707 | 710 | 707 | 707 | 707 | 707 | 690 | 310 | - | [metr.t] |
| Russland | 2.000 | 2.000 | - | - | 2.200 | 2.200 | 2.200 | - | - | - | - | [metr.t] |

Tabelle 10.6: Eingangsdaten für den Rohstoff Graphit von 2000-2010 [5], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [92], [93], [Eigene Berechnungen]

| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|
| Produktion | 571 | 826 | 813 | 742 | 982 | 1.055 | 1.030 | 1.114 | 1.120 | 1.093 | 925 | [t.metr.t] |
| HHI | 2668 | 3544 | 3536 | 4023 | 5293 | 4890 | 5100 | 5358 | 5449 | 5562 | 3240 |] |
| Preis | 550 | 560 | 565 | 619 | 485 | 512 | 528 | 499 | 753 | 694 | 720 | [\$/t] |
| Reserven | 15.100 | 74.300 | 85.700 | 85.700 | 85.700 | 75.600 | 75.600 | 90.000 | 71.000 | 71.000 | 76.800 | [t.metr.t] |
| Ressourcen | 800.000 | 800.000 | 800.000 | 800.000 | 800.000 | 800.000 | 800.000 | 800.000 | 800.000 | 800.000 | 800.000 | [t.metr.t] |
| Recyclingrate | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | [%] |
| China | 220 | 450 | 450 | 450 | 700 | 720 | 720 | 800 | 810 | 800 | 600 | [t.metr.t] |
| Indien | 140 | 140 | 130 | 110 | 120 | 130 | 120 | 130 | 140 | 130 | 140 | [t.metr.t] |
| Brasilien | 12 | 72 | 70 | 61 | 62 | 77 | 76 | 76 | 77 | 76 | 76 | [t.metr.t] |
| Nord Korea | - | - | 25 | 25 | 30 | 32 | 32 | 30 | 30 | 30 | 30 | [t.metr.t] |
| Kanada | 25 | 25 | 25 | 25 | 25 | 30 | 28 | 28 | 27 | 25 | 25 | [t.metr.t] |
| Sri Lanka | - | - | - | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 11 | 8 | [t.metr.t] |
| Ukraine | - | - | - | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 6 | 6 | [t.metr.t] |
| Mexiko | 30 | 21 | 25 | 15 | 8 | 11 | 13 | 13 | 10 | 5 | 7 | [t.metr.t] |
| Madagaskar | 13 | 2 | 1 | 2 | 2 | 15 | 15 | 15 | 5 | 5 | 5 | [t.metr.t] |
| Norwegen | - | - | - | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | [t.metr.t] |
| Andere Länder | 131 | 116 | 87 | 40 | 22 | 27 | 13 | 9 | 8 | 3 | 26 | [t.metr.t] |

Tabelle 10.7: Eingangsdaten für den Rohstoff Indium von 2000-2010 [5], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [92], [93], [Eigene Berechnungen]

| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|----------------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------|
| Produktion | 335 | 345 | 335 | 370 | 405 | 501 | 582 | 563 | 573 | 546 | 609 |
| HHI | 1463 | 1572 | 1412 | 1738 | 2986 | 3939 | 3898 | 3559 | 3341 | 2900 | 3527 |
| Preis | - | - | - | 2.985 | 13.355 | 13.197 | 14.022 | 21.918 | 34.398 | 37.298 | - |
| Reserven | 2.600 | 2.480 | 2.480 | 2.480 | 2.780 | 2.780 | 10.670 | - | - | - | - |
| Ressourcen | - | - | - | 150.000 | 150.000 | 150.000 | 150.000 | 150.000 | 150.000 | 150.000 | - |
| Recyclingrate | - | - | - | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 27 |
| China | 95 | 100 | 85 | 100 | 200 | 300 | 350 | 320 | 310 | 280 | 340 |
| Japan | 50 | 55 | 60 | 70 | 70 | 70 | 55 | 60 | 65 | 67 | 70 |
| Republik Korea | - | - | - | - | - | - | 50 | 50 | 75 | 70 | 70 |
| Kanada | 45 | 45 | 45 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 45 | 40 | 67 |
| Belgien | 40 | 40 | 40 | 40 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Brasilien | - | - | - | - | - | - | - | - | 5 | 5 | 5 |
| Russland | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 16 | 12 | 12 | 4 | - |
| Peru | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 6 | 25 | - |
| Frankreich | 65 | 65 | 65 | 65 | 10 | 10 | 10 | 10 | - | - | - |
| Andere Länder | 20 | 20 | 20 | 25 | 25 | 20 | 15 | 25 | 25 | 25 | 27 |

Tabelle 10.8: Eingangsdaten für den Rohstoff Gallium von 2000-2010 [5], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [92], [93], [Eigene Berechnungen]

| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|
| Produktion | 16 | 22 | 25 | 28 | 35 | 33 | 36 | 40 | 40 | 84 | 70 | [metr.t] |
| HHI | 3.828 | 5.248 | 5.648 | 5.612 | 5.528 | 7.429 | 7.222 | 5.938 | 5.938 | 4.036 | 3.469 | [] |
| Preis | 640 | 640 | 530 | 411 | 550 | 538 | 443 | 530 | 579 | 449 | 600 | [\$/kg] |
| Reserven | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Ressourcen | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | [t.metr.t] |
| Recyclingrate | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| China | 8 | 15 | 18 | 20 | 25 | 28 | 30 | 30 | 30 | 50 | 37 | [metr.t] |
| Ukraine | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 13 | 13 | [metr.t] |
| Kasachstan | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 11 | 11 | [metr.t] |
| Japan | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 | 5 | 6 | 5 | 5 | 7 | 5 | [metr.t] |
| Ungarn | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | - | - | 5 | 5 | 3 | 4 | [metr.t] |

Tabelle 10.9: Eingangsdaten für den Rohstoff Germanium von 2000-2010 [5], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [92], [93], [Eigene Berechnungen]

| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Produktion | 41 | 38 | 39 | 31 | 33 | 42 | 28 | 37 | 37 | 67 | 59 |
| HHI | 4.218 | 4.114 | 4.083 | 4.006 | 4.215 | 4.365 | 6.429 | 6.786 | 6.786 | 4.520 | 4.174 |
| Preis | 1.250 | 890 | 620 | - | - | - | - | 1.240 | 1.490 | 940 | 1.200 |
| Reserven | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Ressourcen | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Recyclingrate | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 30 |
| China | 12 | 13 | 14 | 15 | 15 | 20 | 22 | 30 | 30 | 40 | 32 |
| Ukraine | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 20 | 20 |
| Vereinigte Staaten | 23 | 20 | 20 | 12 | 15 | 19 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Russland | 6 | 5 | 5 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

Tabelle 10.10: Eingangsdaten für die Seltenen Erden von 2000-2010 [5], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [92], [93], [Eigene Berechnungen]

| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|
| Produktion | 83.470 | 83.470 | 98.270 | 99.150 | 102.150 | 122.630 | 122.630 | 123.730 | 123.730 | 132.600 | 133.380 | [metr.t] |
| HHI | 5.458 | 5.458 | 7.914 | 8.626 | 8.665 | 9.422 | 9.422 | 9.411 | 9.411 | 9.469 | 9504 | □ |
| Preis | | | | 4,08 | 4,08 | 5,51 | 6,06 | 6,61 | 8,82 | 5,73 | | \$/kg |
| Reserven | 87.754 | 87.782 | 87.782 | 87.738 | 87.378 | 87.378 | 87.378 | 87.378 | 98.578 | 112.338 | 113.778 | [t.metr.t] |
| Ressourcen | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | [t.metr.t] |
| Recyclingrate | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | [%] |
| China | 73.000 | 73.000 | 88.000 | 92.000 | 95.000 | 119.000 | 119.000 | 120.000 | 120.000 | 129.000 | 130.000 | [metr.t] |
| Indien | 2.700 | 2.700 | 2.700 | 2.700 | 2.700 | 2.700 | 2.700 | 2.700 | 2.700 | 2.700 | 2.800 | [metr.t] |
| Brasilien | 200 | 200 | - | - | - | 730 | 730 | 650 | 650 | 550 | 550 | [metr.t] |
| Malaysia | 450 | 450 | 450 | 250 | 250 | 20 | 20 | 380 | 380 | 350 | 30 | [metr.t] |
| Vereinigte Staaten | 5.000 | 5.000 | 5.000 | - | - | - | - | - | - | - | - | [metr.t] |
| Russland | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | - | - | - | - | - | - | [metr.t] |
| Thailand | - | - | - | 2.200 | 2.200 | - | - | - | - | - | - | [metr.t] |
| Sri Lanka | 120 | 120 | 120 | | | | | | | | | [metr.t] |

Tabelle 10.11: Eingangsdaten für die Platingruppenmetalle von 2000-2010 [5], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [92], [93], [Eigene Berechnungen]

| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| Produktion | 154.090 | 160.110 | 183.790 | 205.000 | 214.440 | 217.400 | 220.680 | 213.250 | 188.860 | 181.580 | 192.548 | [kg] |
| HHI | 3.317 | 3.638 | 4.583 | 5.761 | 5.875 | 6.256 | 6.134 | 6.241 | 6.153 | 6.191 | 6.866 | [] |
| Preis | | | | | | | | | | | | |
| Platin | - | - | - | 694,44 | 848,76 | 899,51 | 1.144,42 | 1.308,44 | 1.578,26 | 1.207,55 | 1.615,56 | [\$/tray.oz] |
| Palladium | - | - | - | 203,00 | 232,93 | 203,54 | 322,93 | 357,34 | 355,12 | 265,65 | - | [\$/tray.oz] |
| Reserven | 71.910 | 71.210 | 71.210 | 71.210 | 71.210 | 71.210 | 71.210 | 71.210 | 71.210 | 66.110 | 66.110 | [metr.t] |
| Ressourcen | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | 100.000 | [metr.t] |
| Recyclingrate | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | [%] |
| Südafrika | 114.000 | 120.000 | 134.000 | 151.000 | 160.000 | 169.000 | 170.000 | 166.000 | 146.000 | 141.00 | 148.000 | [kg] |
| Russland | 30.000 | 29.000 | 35.000 | 36.000 | 36.000 | 30.000 | 29.000 | 27.000 | 23.000 | 21.000 | 25.100 | [kg] |
| Simbabwe | - | - | - | - | - | - | 5.100 | 5.300 | 5.640 | 7.230 | 8.800 | [kg] |
| Kanada | 5.450 | 5.500 | 7.000 | 7.400 | 7.000 | 6.400 | 9.000 | 6.200 | 7.000 | 4.600 | 3.900 | [kg] |
| Vereinigte Staaten | 3.110 | 3.610 | 4.390 | 4.170 | 4.040 | 3.920 | 4.290 | 3.860 | 3.580 | 3.830 | 3.450 | [kg] |
| Kolumbien | - | - | - | - | - | 1.080 | 1.100 | 1.400 | 1.500 | 1.500 | 998 | [kg] |
| Andere Länder | 1.530 | 2.000 | 3.400 | 6.430 | 7.400 | 7.000 | 2.190 | 3.490 | 2.140 | 2.420 | 2.300 | [kg] |

CHRISTIAN BAUER
R. Schmidt Weg 9A
2371 Hinterbrühl
15. Oktober 1985, St. Pölten

Ausbildung

2010–2014 TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

*Doktoratsstudium der technischen Wissenschaften, Rigorosum:
September 2014*

2005–2010 TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

*Studium des Wirtschaftsingenieurswesen-Maschinenbau,
Diplomprüfung: März 2010*

2009 POLITECNICO DI TORINO

Studium im Rahmen des Erasmus Austauschprogrammes

2000–2005 HÖHERE TECHNISCHE BUNDESLEHR- UND VERSUCHSANSTALT MÖDLING

Fachrichtung Wirtschaftsingenieurswesen-Maschinenbau

Beruflicher Werdegang

10/2010–09/2014 Assisten am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik,
Technische Universität Wien

09/2009–03/2010 Diplomarbeit „Financial Evaluation of Thermoelectric Power Ge-
nerators“, Magna Europe AG

08/2008–09/2008 SW Umwelttechnik România – Bukarest, Rumänien.

08/2007–09/2007 RZB Finance LLC – New York, USA

Veröffentlichungen

1. Bauer, C., Tober, W., Geringer, B., *E-Mobilität in Niederösterreich – Potentiale entlang der Wertschöpfungskette*, Ecoplus, St. Pölten, 2013.
2. Bauer, C., *Mobilität im Wandel*, Wien, 2013.

3. Bauer, C, Geringer, B., *Elektromobilität: Überblick, Ausblick und Trends*, Wien, 2013.
4. Sihn, W., Palm, D., Gommel, H., Tober, W., Bauer, C., *Methodik zur Ermittlung und Quantifizierung von Veränderungen in nationalen Wertschöpfungsketten durch Elektromobilität*, WGP-Jahreskongress, Berlin, 2011.
5. Geringer, B., Bauer, C., Tober, W., Sihn, W., Gommel, H., Palm, D., *Gutes Geschäft mit Elektromobilität, Umweltschutz der Wirtschaft – Energieschub für Europa*, Wien, 2011.
6. Geringer, B., Bauer, C., Tober, W., Sihn, W., Palm, D., Gommel, H., *Elektromobilität – Chance für die österreichische Wirtschaft*, Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Wien, 2011.